



Apport de la mesure in-situ pour la maîtrise de la qualité des surfaces fabriquées

Yann Quinsat

► To cite this version:

Yann Quinsat. Apport de la mesure in-situ pour la maîtrise de la qualité des surfaces fabriquées. Génie mécanique [physics.class-ph]. ENS Cachan, 2016. tel-01383606

HAL Id: tel-01383606

<https://hal.science/tel-01383606>

Submitted on 19 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES
DE L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY,
préparée à l'ENS Cachan

ÉCOLE DOCTORALE N° 579
Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences

Spécialité *Génie Mécanique*

Par

Yann Quinsat

**Apport de la mesure *in-situ* pour la maîtrise
de la qualité des surfaces fabriquées**

Présentée et soutenue à *Cachan*, le 11 octobre 2016.

Composition du Jury :

M. Fontaine Jean-François	Professeur, IUT de Dijon/Université de Bourgogne	Rapporteur
M. Hascoët Jean-Yves	Professeur, Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Véron Philippe	Professeur, Ensam ParisTech CER Aix en Provence	Rapporteur
M. Brown Christopher A.	Professeur, Worcester Polytechnic Institute	Examineur
M. Duc Emmanuel	Professeur, Sigma Clermont	Examineur
M ^{me} Lartigue Claire	Professeur, IUT de Cachan/Université Paris SUD	Garant
M. Roussat Jean-Philippe	Safran Aircraft Engines	Invité



Remerciements

Je souhaite remercier tous les membres du jury de leur participation. Emmanuel Duc pour avoir accepté de présider le jury, Jean-François Fontaine, Jean-Yves Hascoët et Philippe Véron pour avoir bien voulu rapporter ces travaux et Christopher A. Brown et Jean-Philippe Roussat comme examinateur.

Je souhaite aussi remercier Christophe Tournier pour la confiance qu'il m'a accordée dans l'encadrement de la thèse d'Anthony Guiot, ainsi que Claire Lartigue, pour m'avoir fait confiance et grandement soutenue depuis mon arrivée au LURPA.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du département de Génie Mécanique de L'ENS Paris-Saclay et du LURPA avec lesquels je travaille au quotidien. Et enfin, je pense aussi à tous les étudiants de thèse et de master qui ont participé pleinement à ces travaux de recherche.

Table des matières

Table des matières	iii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xi
Avant-propos	1
I Notice Individuelle	3
1 Curriculum vitae	5
1.1 Etat-civil	5
1.2 Situation professionnelle actuelle	5
1.3 Formation	5
1.4 Expérience Professionnelle	6
2 Activités d'enseignement	7
2.1 Assistant à l'Université Concordia de Montréal	7
2.2 Monitorat	7
2.3 Professeur agrégé à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan 256h/an	7
2.4 Responsabilités pédagogiques	13
2.5 Rayonnement	14
2.6 Autres activités	14
2.7 Récapitulatif des enseignements	15
3 Activités de recherche	16
3.1 Activités de recherche antérieures à 2004	16
3.2 Activités de recherche au LURPA	18
3.3 Encadrement et animation	26
3.4 Collaboration Internationale	27

3.5	Collaboration Industrielle	27
3.6	Rayonnement	28
4	Publications	29
4.1	Revue internationale à comité de lecture	29
4.2	Autres Revues	30
4.3	Conférences internationales avec comité de lecture soumises	30
4.4	Conférences internationales avec comité de lecture	30
4.5	Conférences nationales avec comité de lecture.	32
4.6	Travaux universitaires	32

II Travaux de Recherche 33

Introduction 35

1 Etude de la topographie générée par le procédé de fabrication 39

1	Introduction	41
2	Prédiction de l'état de surface obtenu en fraisage	44
2.1	État de l'art	44
2.2	Principe de simulation employé [Quinsat et al., 2008]	46
2.3	Évolutions de la simulation	47
2.4	Limite géométrique de la simulation [Lavernhe et al., 2014]	50
3	Étude des relations entre la stratégie d'usinage et la fonction à réaliser	52
3.1	Apport de l'étude de la topographie de surface sur l'optimisation du processus	52
3.2	Relation avec les paramètres fonctionnels [Lavernhe et al., 2010, Quinsat et al., 2011]	54
3.3	Intégrité de surface [Vulliez et al., 2014]	56
4	Maîtrise de la qualité des surfaces en polissage [Guiot, 2012, Quinsat et al., 2015]	58
4.1	Principe	59
4.2	Stratégie de polissage à taux d'enlèvement de matière constant	61
5	Conclusion	64

2	Mesure in-situ	67
1	Introduction	69
2	Gestion des gammes de fabrication et de Mesure	72
2.1	Description des données	73
2.2	Description des activités	75
2.3	Sélection de capteurs	76
3	Intégration et qualification des capteurs pour la mesure <i>in-situ</i>	81
3.1	Mesure par capteur chromatique confocal [Quinsat and Tournier, 2012]	81
3.2	Mesure par capteur laser plan	84
3.3	Mesure par système de Vision [Dubreuil, 2016]	86
4	Conclusion	100
3	Stratégie de numérisation en contexte <i>in-situ</i>	103
1	Introduction	105
2	Stratégie de numérisation	106
2.1	Sur données numérisées [Audfray, 2009]	107
2.2	Sur modèle CAO	110
3	Numérisation minimale et gestion des trous de numérisation	117
3.1	Mise en donnée	118
3.2	Définition de la matrice de raideur	119
3.3	Énergie de déformation	120
3.4	Détection des trous et calcul des déplacements	121
4	Numérisation globale : Mesure de forme par corrélation d'images [Dubreuil et al., 2016]	123
4.1	Mesure de la forme par déformation	124
4.2	Application à la détection des écarts géométriques	127
5	Conclusion	131
4	Perspectives de recherche	133
1	Introduction	135
2	Analyse des topographies de surface obtenues en fabrication additive	136
2.1	État de l'art	137
2.2	Traitement des données	138

2.3	Une première approche : Étude de l'aire relative interne et variation de l'échelle	140
3	Amélioration du temps traitement des données	147
4	Suivi de la maquette numérique : fusion de données et modification du processus	149
4.1	Intégration des données acquises à la maquette numérique	150
4.2	Intégration des corrections à la maquette numérique	150
5	Conclusion	151
Conclusion		153
Bibliographie		156
III Principaux Articles		171
S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue, C. Brown, Realistic simulation of surface defects in five-axis milling using the measured geometry of the tool, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 74, pp. 393-401, 2014		173
Y. Quinsat, C. Tournier, In situ non-contact measurements of surface roughness, Precision Engineering, Vol. 36, pp. 97-103, 2012		185
Y. Quinsat, C. Lartigue, Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, pp. 411-421, 2015		195

Table des figures

1	Conception d'une machine de découpe de cuir à structure parallèle	8
2	Retro-conception d'une pagaie	9
3	Simulation d'injection plastique - Temps de remplissage <i>Moldflow</i> ®	9
4	Simulation du remplissage - Carte des températures <i>Thercast</i> ®	10
5	Mesure par caméra rapide d'une coulée	10
6	Simulation de la formation du copeau en coupe orthogonale <i>Forge 2009</i> ®	11
7	Mesure de puissance et de vitesse lors du passage d'un raccordement en usinage de poche	12
8	Activité de travaux pratiques en photogrammétrie	13
9	Reconstruction d'un kayak de free-style	13
10	Contexte de la mesure <i>in-situ</i> [Dubreuil et al., 2015]	18
11	Présentation du contexte des travaux	35
1.1	Liens entre fonction-applications-procédé [Bruzzone et al., 2008]	41
1.2	Liens entre fonction-topographie-procédé [Whitehouse, 2001]	42
1.3	Comparaison entre surface usinée (gauche) et simulée (droite) [Quinsat, 2004]	46
1.4	Résultats de simulations ($f_z = 0,2mm$, $p = 0,2mm$) pour une inclinaison nulle à gauche et de 15° à droite [Quinsat, 2004]	47
1.5	Représentations possibles d'un outil	48
1.6	Vitesse d'avance simulée et mesurée le long d'une trajectoire	49
1.7	Comparaison des topographies réelles et simulées	50
1.8	Répétition des motifs	51
1.9	Principe du Calcul	51
1.10	Détail de la surface de l'arête de coupe	52
1.11	Motifs obtenus : Mesuré - Simulé avec maillage mesuré- Simulé avec maillage nominal [Lavernhe et al., 2014]	53

1.12	Cacul du paramètre S_z	53
1.13	Effet des paramètres de la stratégie d'usinage [Lavernhe et al., 2010] . . .	54
1.14	Définition de l'angle de pivotement θ_n et d'inclinaison θ_t	55
1.15	Comparaison des topographies pour des orientations d'outil différentes . .	57
1.16	Représentation de la courbure à différentes échelles pour les profils extraits figure 1.15	57
1.17	Comparaison entre polissage manuel et automatisé	59
1.18	Variation de l'efficacité le long de la trajectoire	61
1.19	Prise en compte de l'usure de l'abrasif [Quinsat et al., 2015]	63
2.1	Contexte de la mesure <i>in-situ</i> [Dubreuil et al., 2015]	69
2.2	Différents process de contrôle [Cho and Seo, 2002]	71
2.3	Modèle de données proposé par [Zhao et al., 2008]	72
2.4	Diagramme de définition de blocs pour une mesure en dehors de la machine- outil	73
2.5	Diagramme de définition de blocs pour la mesure <i>in-situ</i>	74
2.6	Modélisation de la gamme de fabrication/mesure	75
2.7	Diagramme d'activité pour la mesure en contexte <i>on-machine</i>	76
2.8	Diagramme d'activité avec outil de pré mesure	77
2.9	Description du système étudié	82
2.10	Etude de répétabilité sur l'axe Z	83
2.11	Comparaison des mesures pour une rayure étalon	83
2.12	Principe d'intégration du Kreon	84
2.13	Intégration d'un capteur laser plan dans une MOCN	85
2.14	Evaluation du bruit par le protocole Qualipso pour le Kreon KZ25 sur MOCN	85
2.15	Description du modèle de sténopé	87
2.16	Identification de la transformation T	88
2.17	Description du calcul de l'erreur de projection	89
2.18	Calibration dans l'environnement d'une machine-outil	90
2.19	Représentation de l'erreur de reprojection	90
2.20	Description de la simulation de Monte-Carlo	91

2.21	Représentation des distributions des erreurs de reprojection en considérant toutes les sources d'incertitudes (a) et (b) ou uniquement l'extraction des entités (c) et (d)	92
2.22	Présentation du système de mesure	93
2.23	Projection du modèle CAO	94
2.24	Définition de la ROI et de sa projection	95
2.25	Description de l'exemple étudié	96
2.26	Images gauche et droite de la pièce étudiée	96
2.27	Cartographies des résidus de corrélation mesurés et attendus	97
2.28	Principe de l'optimisation en position et orientation de chacune des facettes	98
2.29	Cartographies des résidus de corrélation	99
2.30	Calcul des déplacements (pixels) et détection des défauts	100
3.1	Exemple d'occultation caméra [Zuquete Guarato, 2013]	106
3.2	Trajectoire de numérisation [Lartigue et al., 2014]	107
3.3	Représentation des orientations [Audfray, 2009]	108
3.4	Représentation de l'évolution des orientations [Audfray, 2009]	109
3.5	Fenêtre de mesure optimale, plane (à gauche), et tridimensionnelle (au milieu) et modélisation du cône de visibilité du capteur. [Zuquete Guarato, 2013]	111
3.6	Voxélisation initiale [Lartigue et al., 2014]	111
3.7	Qualification des voxels [Lartigue et al., 2014]	112
3.8	Représentation des points de vue obtenus par la méthode <i>Voxel2Scan</i> sur un vilebrequin	113
3.9	Simulation de numérisation sous Robcad [®]	114
3.10	Intégration d'un capteur laser plan dans une MOCN	115
3.11	Posage capteur et format de trajectoire	116
3.12	Principe du simulateur de numérisation	116
3.13	Méthode proposée	117
3.14	Modélisation proposée pour les poutres	119
3.15	Définition des repères	120
3.16	Détection des trous et réduction du maillage étudié	121
3.17	Exemple de la méthode de déformation	122

3.18	Mesure de la forme 3D à partir de la représentation tessellée de la pièce .	125
3.19	Principe du déplacement des nœuds selon la normale locale	126
3.20	Comparaison des modes de déplacements possibles	126
3.21	Discretisation d'une facette selon 36 points d'évaluation	127
3.22	Modèle CAO de la pièce étudiée	128
3.23	Représentation des résultats obtenus par mesure au capteur laser plan . .	128
3.24	Photographie de la pièce mesurée	129
3.25	Représentation des résidus de stéréo-corrélation	130
3.26	Déplacement mesuré en chacun des nœuds (mm)	130
4.1	Évolutions des travaux sur l'analyse des surfaces produites	135
4.2	Exemple de structure interne	136
4.3	Description des essais de fissuration	137
4.4	Mode remplissage	138
4.5	Représentation des données mesurées	139
4.6	Représentation de la cale étalon et de l'extraction réalisée	139
4.7	Extraction de l'aire de la peau	141
4.8	Représentation des différentes étapes dans le plan XY	141
4.9	Représentation de l'extraction de la peau de la pièce	142
4.10	Évolution des données mesurées et de la frontière extraite en fonction de la taille de voxel étudiée (% de la résolution de la mesure)	143
4.11	Analyse multi-échelles	143
4.12	Comparaison des méthodes de remplissage	144
4.13	Analyse multi-échelles	146
4.14	Représentation des effets	146

Liste des tableaux

1.1	Plan d'expérience réalisé	55
1.2	Relation entre la courbure et la fatigue	58
2.1	Entités identifiables sur les images	89
3.1	Description des degrés de liberté (DOF)	118
4.1	Mesures de K_c	137
4.2	Test sur un artefact étalon	140
4.3	Description des niveaux choisis	145
4.4	Table L_9	145
4.5	Qualité des régressions linéaires	146

Avant-propos

Ce document présente le bilan de mes activités de recherche débutées lors d'un stage de recherche à l'Université Concordia de Montréal, ainsi qu'un bilan des différentes activités d'enseignement et administratives effectuées durant cette période. Ce document comporte deux parties. La première partie est composée d'une notice individuelle qui contient un résumé de mes activités pédagogiques et de recherche. La seconde partie est un bilan plus exhaustif de mes activités au LURPA. Cette partie principale détaille notamment mes travaux sur l'apport de la mesure *in-situ* pour la maîtrise de la qualité des surfaces fabriquées et concerne :

- L'étude de la topographie 3D de surface comme intermédiaire entre la fonction et le processus,
- La mesure *in-situ* avec capteur sans contact,
- La définition de stratégie de mesure en contexte *in-situ*.

Les perspectives de recherche envisagées sont présentées dans le quatrième chapitre de cette partie.

Première partie

Notice Individuelle

1 Curriculum vitae

1.1 Etat-civil

Né le 5 mars 1977 (39 ans)

Nationalité française

Pacsé – 2 enfants

1.2 Situation professionnelle actuelle

Professeur agrégé au département de génie mécanique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan depuis septembre 2004.

Chercheur associé au Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) dans l'équipe Géo3D « Géométrie tridimensionnelle des pièces et des mécanismes » depuis septembre 2004.

1.3 Formation

2004 : Docteur de l'université Blaise Pascal, spécialité Génie Mécanique

Titre : « Contribution au choix de stratégies d'usinage : application à la finition des pièces de formes complexes »

Thèse réalisée au LaMI (Laboratoire de Mécanique et Ingénieries) anciennement LaRAMA (Laboratoire de Recherches en Mécanique Avancée). Soutenance le 13 Octobre 2004 à l'IFMA (Institut Français de Mécanique Avancée) à Clermont-Ferrand. Obtenue avec la mention Très Honorable devant le jury :

Maurice Lemaire	PR IFMA	Président
Jean-Yves Hascoët	PR ECN	Rapporteur
Patrick Martin	PR ENSAM	Rapporteur
Grigore Gogu	PR IFMA	Directeur de thèse
Laurent Sabourin	Mcf IFMA	Co-encadrant

1996-2001 Elève normalien à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan

Sept 2000-Juin 2001 : Quatrième année à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

DEA Génie Mécanique Génie Civil mention Bien. Université Blaise Pascal.

Stage de Recherche au LaMI sur la génération de gamme en usinage multi-pièces.

Sept 1999-Juin 2000 : Congé pour convenance personnelle auprès de l'E.N.S de Cachan

Cours de Graduate Studies (Mécanique des fluides et Vibrations) à l'Université Concordia (Montréal).

Stage de recherche au Free Form Laboratory de l'Université Concordia (Montréal) : réalisation d'une machine de prototypage rapide par déposition de poudre Sand-Printer.

Juin 1999 : Admission au rang de premier à l'agrégation de Génie Mécanique.

Sept 1996-juin 1999 : Scolarité à l'ENS de Cachan.

Préparation de l'agrégation de Génie Mécanique à l'E.N.S. de Cachan.

1998 Maîtrise de Technologie Mécanique option productique mention Assez Bien à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et l'E.N.S. de Cachan.

1997 Licence de Technologie Mécanique mention Assez Bien à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et l'E.N.S. de Cachan.

1.4 Expérience Professionnelle

2001-2004 : Allocataire Moniteur Normalien : Monitorat à l'Institut Français de Mécanique Avancée

1999-2001 : Assistant à l'Université Concordia

2 Activités d'enseignement

Cette partie présente les activités d'enseignement réalisées depuis l'obtention de l'agrégation de génie mécanique en 1999. Une synthèse de ces activités est proposée au paragraphe 2.7.

2.1 Assistant à l'Université Concordia de Montréal

En congé pour convenance personnelle auprès de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan lors de l'année scolaire 1999/2000, j'ai été chargé d'enseignement à l'Université Concordia de Montreal.

Conception mécanique assistée par ordinateur (30h TP) : MECH 412 (Computer Aided Mechanical Design) formation complémentaire sur les méthodes de conception par ordinateur. Les travaux pratiques s'appuient sur le logiciel CATIA V5.

2.2 Monitorat

J'ai été de 2001 à 2004 moniteur (64 h/an) à l'Institut Français de Mécanique Avancée (Clermont Fd).

Bases de la conception et de la fabrication 1 (158h TD/TP) : Les enseignements dispensés abordent les modes de générations de formes, la formation du copeau, le choix des outils ainsi que des conditions de coupe, la réalisation de montage d'usinage et le contrôle en fin de production.

Bases de la conception et de la fabrication 2 (14h TD/TP) : Les thèmes abordés concernent la gamme d'usinage et la programmation sur commande numérique.

Mise en forme et assemblage (20h TD) : Cette unité de valeur a pour but de permettre aux étudiants d'acquérir les connaissances nécessaires à la mise en forme des pièces mécaniques par usinage ou déformation de matière.

2.3 Professeur agrégé à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan 256h/an

Actuellement professeur agrégé au département de génie mécanique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, j'interviens au cours des quatre années de formation (en première année SAPHIRE, M1 INP, M2 FesSup option Science Mécanique anciennement

préparation à l'agrégation de Mécanique et Génie mécanique, en M2 IN2P). Actuellement, responsable de trois modules de formations (FAO et Mesure 3D Multi-Capteurs en M1 et Advanced Manufacturing en M2) et anciennement de deux modules (Conception & Modélisation Assistées par Ordinateur en L3 et Optimisation des procédés de fabrication en M1), mes activités d'enseignement s'articulent autour des thèmes suivants :

- CAO et FAO
- Procédés de mise en forme
- Mise au point et réglage des systèmes de production
- Acquisition de formes et traitement de nuages de points
- Ingénierie pédagogique

2.3.1 CAO et FAO

Mes enseignements portent sur les différentes étapes de la chaîne numérique de conception et de réalisation des produits. Ils me permettent ainsi de mettre en évidence les contraintes d'associativité et de qualité de chacune de ces étapes. Au travers d'activités de BE, les étudiants sont formés aux méthodologies de conception basées sur la définition d'un squelette paramétré. Ils ont ainsi l'opportunité de réaliser des maquettes numériques de mécanismes complets (figure 1). La modélisation des courbes et des surfaces est abordée au travers d'activité de rétro-conception. Les différents modèles de représentation paramétrique des courbes et surfaces (Bezier et B-spline) sont utilisés pour approximer des données issues de la numérisation d'un objet. J'ai par exemple personnellement mis en place une activité complète de 12h de rétro-conception de pagaie de kayak (figure 2).



Figure 1 – Conception d'une machine de découpe de cuir à structure parallèle

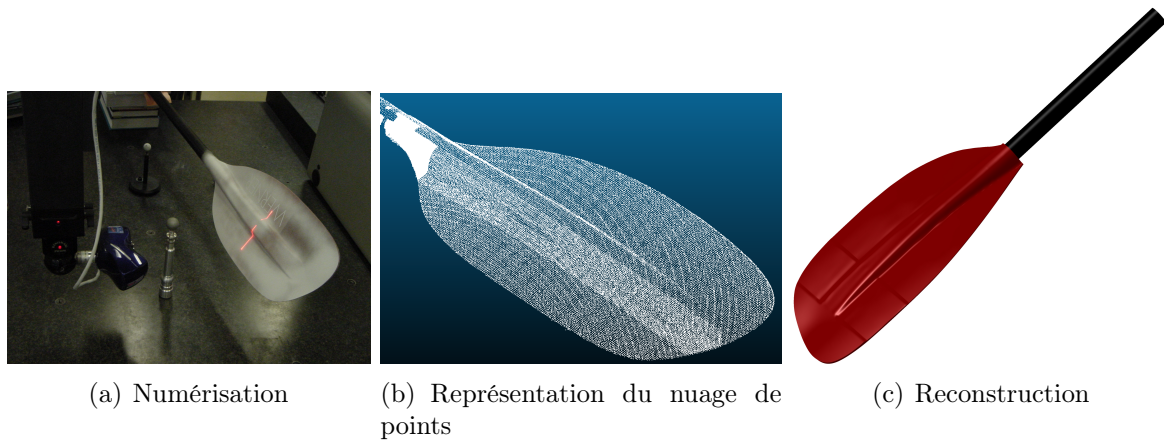
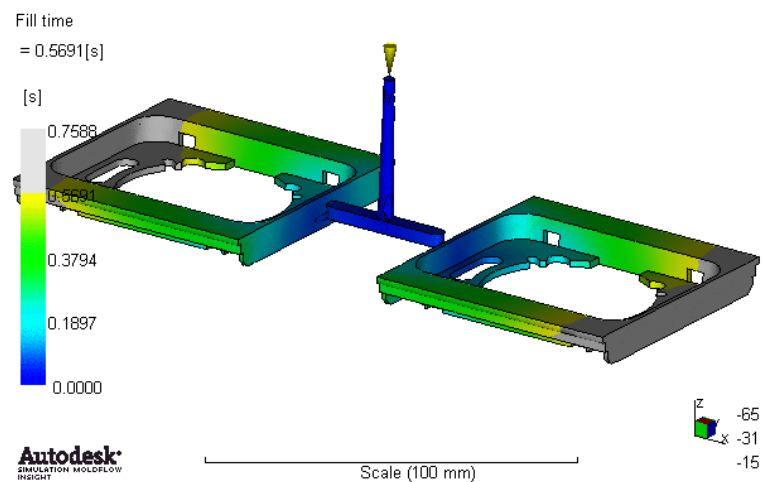


Figure 2 – Retro-conception d'une pagaie

Enfin, une part de mes enseignements dans le domaine de la CFAO porte sur la modélisation du processus de fabrication et la génération de trajectoires. Au travers d'un module d'enseignement en M1, dont j'assure la gestion depuis 2009, les étudiants abordent la définition de modèle numérique de machine outil et d'environnement de simulation d'usinage. Les principaux modes de génération de trajectoire d'usinage en 2 axes 1/2 et 3 axes sont aussi étudiés et illustrés par la réalisation de cas tests sur machine outil. Les problématiques de modélisation géométrique directe et inverse pour la conception de post-processeur sont mises en évidence.

2.3.2 Procédés de mise en forme

Figure 3 – Simulation d'injection plastique - Temps de remplissage *Moldflow*®

Au travers de modules de formation en SAPHIRE et M1, j'enseigne les principaux procédés de mise en forme à l'état solide (matriçage, estampage), mise en forme par conformation (injection plastique) et mise en forme à l'état liquide (fonderie). L'objectif de ces cours est de mettre en avant les phénomènes physiques mis en jeu lors du procédé (thermique, loi de comportement, etc.), d'analyser une solution technique d'élaboration de formes, d'appliquer de manière raisonnée des règles de tracé, et d'identifier des contraintes géométriques et dimensionnelles associées. Une part importante des activités de pré-conception et d'analyse des règles de tracé sont basées sur la réalisation de simulations numériques (figure 3 et 4) et de coulées de pièces réelles observées par caméra rapide (figure 5).

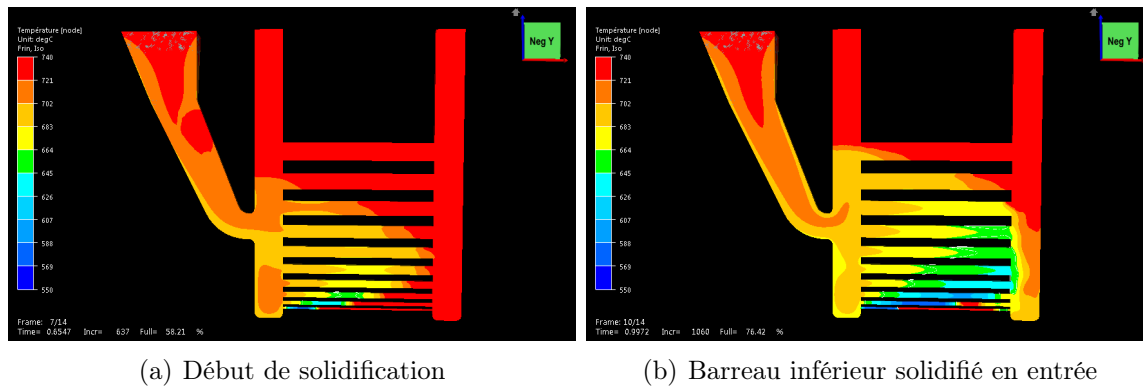


Figure 4 – Simulation du remplissage - Carte des températures *Theracast*®

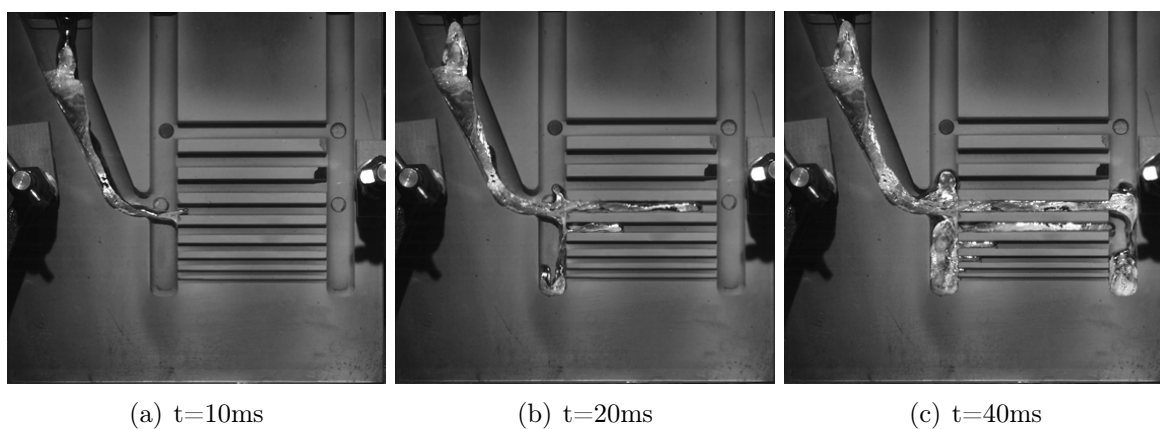


Figure 5 – Mesure par caméra rapide d'une coulée

L'usinage par enlèvement de matière est le procédé de mise en forme le plus présent dans mes enseignements. Au travers d'un module de M2, j'enseigne la coupe des métaux. La formation du copeau, les efforts de coupe, les problématiques de vibrations et d'intégrité de surface sont particulièrement étudiés. J'ai ainsi mis en place différentes activités de TP et BE, dont une consacrée à l'étude d'un plan d'expériences numériques (24 essais) réalisé sous *forge 2009*[®] (figure 6).

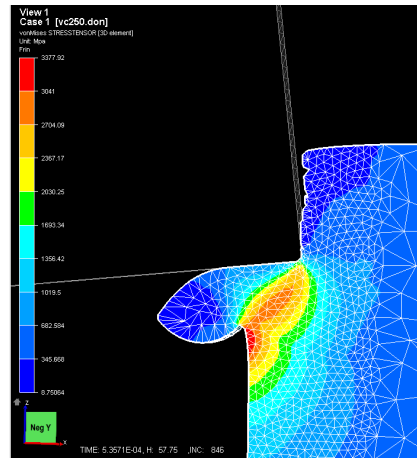


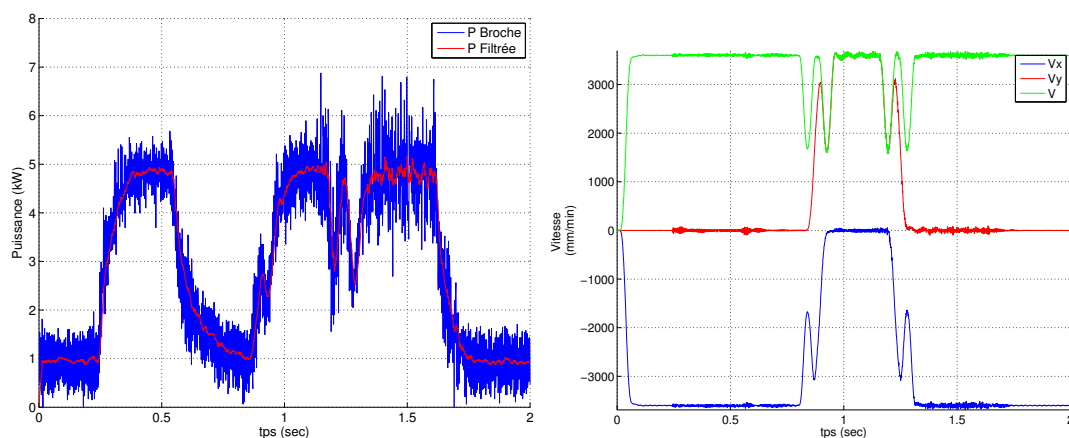
Figure 6 – Simulation de la formation du copeau en coupe orthogonale *Forge 2009*[®]

2.3.3 Mise au point et réglage des systèmes de production

Lors de mes enseignements sur la mise au point et le réglage des systèmes de production, la rédaction d'avant projet de fabrication, la détermination de la cotation de fabrication et le choix des conditions de coupe sont tout particulièrement abordés. Une part importante de ces enseignements porte sur le réglage, la mise en œuvre des MOCN ainsi que le choix de stratégie d'usinage en contexte UGV. L'influence des paramètres de la stratégie est illustrée par des tests et des mesures sur machine outil (figure 7).

2.3.4 Acquisition de formes et traitement de nuages de points

Considérant que les techniques de mesure sans contact vont occuper une place importante dans le domaine de la mesure, je m'investis particulièrement dans la formation des étudiants à ce domaine ainsi qu'au traitement des nuages de points. De plus, ceci me permet dans les formations de M1 et M2 que j'anime, de lier mes activités de recherche concernant les stratégies de numérisation et la qualité des nuages de points avec mes activités d'enseignement.



(a) Relevé de la puissance consommée par la broche (b) Relevé des vitesses selon l'axe X et Y

Figure 7 – Mesure de puissance et de vitesse lors du passage d'un raccordement en usinage de poche

Ainsi, une partie de mes enseignements porte sur les processus d'acquisition de géométrie, tout particulièrement sur ceux s'appuyant sur des systèmes de numérisation par moyens optiques. L'objectif de ces activités d'enseignement est de mettre en place les principes, outils et méthodes associés à l'acquisition de la géométrie des formes des pièces pour les systèmes par triangulation (figure 8), de type laser-plan par projection de franges ou stéréovision. Ainsi, tout particulièrement au travers d'un module de mesure 3D Multi-Capteurs de 30h en M1 dont j'ai la responsabilité et que j'ai entièrement monté en 2015, les compétences acquises par les étudiants sont :

- Sélectionner un capteur pour une application donnée
- Analyser et qualifier les données issues des systèmes de mesure sans contact
- Mettre en cohérence les données acquises

J'interviens également dans les modules de M2 dans des activités de TP en acquisition et traitement de nuage de points, ainsi que de reconstruction de surfaces.

2.3.5 Ingénierie pédagogique

Dans le cadre du master FESup Sciences Mécaniques, j'interviens pour la formation des étudiants à la conception de séquences pédagogiques. Je suis plus particulièrement impliqué dans la préparation de séquences à destination d'élèves dans les filières de BTS Conception de produits industriels - CPI et Industrialisation des Produits Mécaniques - IPM sur les procédés de mise en forme.

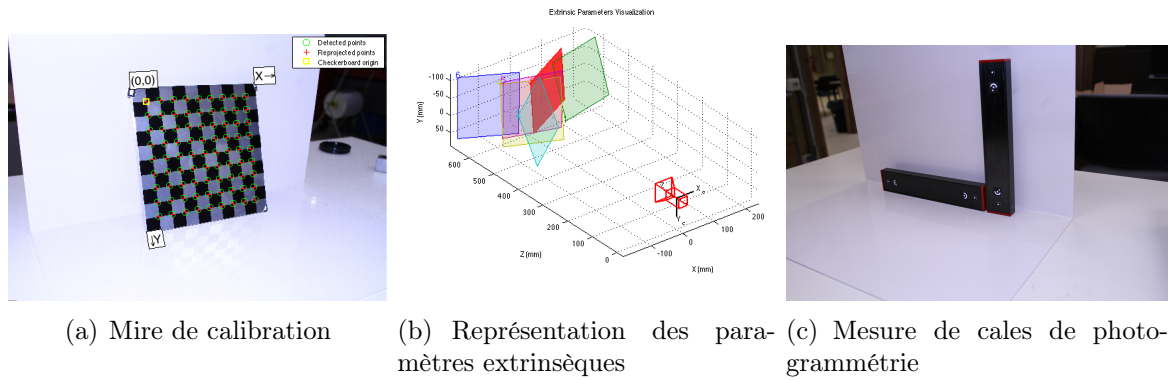


Figure 8 – Activité de travaux pratiques en photogrammétrie

2.3.6 Projet

J'encadre aussi chaque année des projets de M1 (20h TD/projet) et des étudiants de M2 Fes (14h TD/étudiant) dans le cadre de la préparation de l'épreuve de dossier de l'agrégation. Pour cette épreuve, les étudiants doivent, dans le cadre d'une collaboration avec une entreprise, résoudre une problématique de conception ou d'industrialisation d'un produit ou d'un système de production. A titre d'exemple, il a été possible, via un projet d'étudiant, de numériser et de reconstruire un kayak free-style afin d'en élaborer un modèle pour kayakiste plus léger (figure 9).

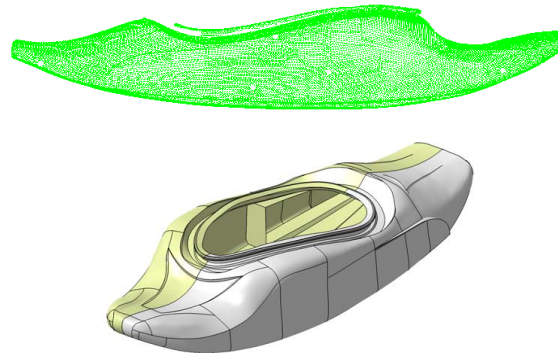


Figure 9 – Reconstruction d'un kayak de free-style

2.4 Responsabilités pédagogiques

De septembre 2007 à Juin 2012, j'ai été responsable pédagogique de l'option Génie Mécanique du Master Fes Science Mécanique (anciennement préparation à l'agrégation de Génie Mécanique) de l'ENS de Cachan. Cette responsabilité comporte la gestion des 750h/élève de formation, la recherche d'intervenants extérieurs ainsi

que l'accompagnement des étudiants dans leur préparation au concours de l'agrégation.

De septembre 2013 à Juin 2014, j'ai été responsable pédagogique du Master Fes Science Mécanique, préparant à l'agrégation de Sciences de l'Ingénieur. Cette agrégation est issue de la fusion des agrégations de mécanique et de génie mécanique.

Depuis septembre 2014, je suis responsable du laboratoire de CAO du département de génie mécanique de l'ENS de Cachan. Le département possède 5 salles de CAO de 8 postes chacune. Ces salles sont administrées avec l'aide d'un technicien informatique C. Cheveaux. Cette fonction implique la gestion de l'achat et de la maintenance des licences pour les logiciels, et la gestion de l'obsolescence du parc machine.

2.5 Rayonnement

De septembre 2007 à décembre 2012, j'ai été directeur adjoint du pôle AIP Primaire Ile de France (pôle regroupant l'Ecole Centrale Paris, Ensam ParisTech Paris, UTC, Supmeca, Ecole Normale Supérieure de Cachan), représentant de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, après avoir été membre du comité de direction du pôle de 2005 à 2007. J'ai assuré le remplacement de L. Champaney à la direction du pôle IdF durant l'année scolaire 2009-2010. Le pôle IdF disposait d'un budget annuel de 192 k€ et d'un demi-poste de secrétariat. Le rôle du comité de direction consiste à réaliser l'animation des activités communes sur l'ensemble des établissements (achats, organisation de journées thématiques).

2.6 Autres activités

Membre de jurys : Manipulation de SI banque PT depuis 2004, TIPE en PSI concours ENS Cachan-X depuis 2011, Agrégation Interne de Génie Mécanique session 2011

Création de stages CIES : Dans le cadre de ma formation de moniteur, assuré par le Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur de Lyon, j'ai co-organisé deux stages (2002 et 2003) ayant pour thème L'enseignement des Sciences pour l'Ingénieur, comment évoluer avec les élèves et les industriels ?

Formation de formateurs : En 2011, j'ai mis en place et co-animé un stage de formation à destination des enseignants de BTS de l'Académie de Créteil intitulé

Intégrer les spécificités de l'UGV dans un processus d'usinage : Adapter les trajectoires FAO et les fonctions CN à l'UGV. Ce stage abordait tout ou partie des points suivants :

- Description d'une cellule UGV (machine, moyen),
- Analyse des trajectoires FAO en usinage 2 axes $\frac{1}{2}$ et 3 axes (modification de l'engagement radial, variation de puissance et vitesse réelle),
- Etude des formats de description de trajectoires et des fonctions CN de lissage et d'anticipation.

Mise à disposition de support de formation pour le matricage et les règles de tracé associées sur le portail national de ressources - éducol STI : http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/le-procede-dobtention-de-bruts-par-matricage et http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/_pedagogiques/6927/6927-le-matricage-regles-de-trace-ens.pdf

Vacations : Depuis 2012 j'interviens dans les travaux pratiques (32h TP) de métrologie du DUT GMP à l'IUT de Cachan. Je suis également intervenu durant 3 années lors de travaux pratiques de CAO (12h) en licence professionnelle de métrologie à l'IUT de St Denis.

2.7 Récapitulatif des enseignements

Matière	Année	Type et volume/an (éq TD)	Etablissement	Niveau
Computer aided design	2000	TP (30h)	Univ. Concordia	M2
Base de la conception et de la fabrication I	2001/2004	CM/TD/TP (50h)	IFMA	L3
Base de la conception et de la fabrication II	2001/2004	TD/TP (6h)	IFMA	L3
Mise en forme et assemblage	2001/2004	TD (8h)	IFMA	M1
CAO - FAO	2004/...	CM/TD/TP (60h)	ENS Cachan	L3-M1-M2
Mise en Forme	2004/...	CM/TD/TP (44h)	ENS Cachan	L3-M1-M2
Mise au point réglage des systèmes de production	2004/...	CM/TD/TP (48h)	ENS Cachan	L3-M1-M2
Acquisition de formes et traitement de nuages de points	2004/...	CM/TD/TP (46h)	ENS Cachan	M1-M2
Ingénierie Pédagogique	2012/...	TP (32h)	ENS Cachan	M2
Préparation dossier agrégation	2004/...	(28h)	ENS Cachan	M2
Projet	2004/...	(20h)	ENS Cachan	M1

3 Activités de recherche

Cette partie présente succinctement l'ensemble des travaux de recherche réalisés. Une première partie est consacrée à la description des activités antérieures à 2004, il s'agit d'un stage de recherche long, des travaux de DEA et de la thèse. Dans une seconde partie, les activités de recherche menées en tant que chercheur associé au LURPA depuis septembre 2004 sont détaillées.

3.1 Activités de recherche antérieures à 2004

3.1.1 Stage de recherche au Free Form Laboratory - Université Concordia

Dans le cadre d'une année de congé pour convenance personnelle prise lors ma formation d'élève normalien, j'ai réalisé de septembre 1999 à juin 2000 un stage de recherche sur la conception d'une machine de prototypage rapide par déposition de poudre [29]. Les travaux réalisés ont porté plus particulièrement sur la caractérisation expérimentale de l'influence des sollicitations dynamiques sur le débit des buses de déposition. Il s'agissait d'étudier l'influence de l'amplitude et de la fréquence des vibrations sur la quantité et l'étendue de la poudre déposée.

Mots Clés : *Prototypage rapide ; Vibration ; Matériaux granulaires*

3.1.2 DEA Génie mécanique, Génie Civil - Université Blaise Pascal - Clermont Fd

Les travaux de recherche en DEA [37] ont porté sur la réalisation des pièces parallélépipédiques, ne nécessitant pas l'usinage de forme gauche et produite en série sur centre d'usinage de fraisage 4 ou 5 axes. L'objectif était d'optimiser selon différents critères les trajectoires de déplacements outil hors matière (hors cycle d'usinage), dans le cadre d'une configuration multi-pièces. Ce problème d'optimisation multi-critères se rapproche du problème du voyageur de commerce identifié comme un problème NP-complet (non calculable en temps polynômial). Parmi les méthodes d'optimisation, les algorithmes génétiques sont particulièrement bien adaptés à ce type de problème. Notre étude a porté sur la définition d'un modèle associé aux différentes trajectoires et aux contraintes liées à la gamme de fabrication. Ces travaux ont abouti [14] à la définition d'un algorithme génétique multi-objectifs permettant la définition d'un front de Pareto

lié à une minimisation des temps improductifs, et à une maximisation de la sécurité des trajectoires.

Mots Clés : *Algorithme Génétique ; Stratégie d'usinage ; Optimisation multi-critères ; Trajectoires outil*

3.1.3 Travaux de thèse Université Blaise Pascal - Clermont Fd

Sous le statut Allocataire Moniteur Normalien, j'ai réalisé de 2001 à 2004 sous la direction de G. Gogu et le co-encadrement de L. Sabourin, une thèse de doctorat au LaMI.

Mes travaux de thèse ont porté sur la finition des pièces de formes complexes. Pour cette typologie de pièces, les logiciels de FAO permettent l'utilisation de nombreux modes de génération de trajectoires outil (zig-zag, spirale, z-constant, plans parallèle, iso-paramétrique, etc.) basés sur la géométrie à réaliser. De nombreuses stratégies d'usinage peuvent être employées pour une même forme. Néanmoins, ce choix reste du domaine de l'expert. En effet, il n'existe aucune règle explicite permettant le choix des paramètres nécessaires à la construction des trajets outil à partir de l'analyse du modèle numérique et des spécifications. L'objectif du travail effectué au cours de mes travaux de thèse a consisté à fournir une méthode d'aide au choix de direction d'usinage dans le cadre de la réalisation par plans parallèles des pièces de formes complexes. Dans une première partie la notion de stratégie d'usinage est définie. Une hiérarchisation par la méthode Mic-Mac de l'ensemble des variables intervenant dans le choix de stratégie d'usinage montre que la direction d'usinage est le paramètre clé de ce problème. Ensuite, une méthode de sélection de direction d'usinage basée sur l'introduction d'une fonction de performance et la définition de faisceaux directionnels est définie [12,13,26,27,28]. Puis, le couplage entre la direction d'usinage et un paramètre d'état de surface est réalisé en fonction de la géométrie de la pièce. Enfin, une méthodologie de choix de direction d'usinage minimisant le temps d'usinage et garantissant la contrainte d'état de surface est développée et appliquée sur des exemples.

Mots Clés : *Stratégie d'usinage ; Etat de surface ; Opération de finition ; Pièce de formes complexes ; Usinage trois axes*

3.2 Activités de recherche au LURPA

Nommé professeur agrégé au département de génie mécanique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan en septembre 2004, j'ai souhaité poursuivre mes activités de recherche en temps que chercheur associé au LURPA. Ceci tout particulièrement dans l'équipe Géo3D, dont les activités de recherche concerne la qualité géométrique des pièces et des mécanismes. En ce sens, l'objectif des travaux entrepris dans l'équipe consiste à développer des méthodes, des modèles et des outils permettant d'améliorer les processus de conception et de fabrication. Les thèmes de recherche abordés sont le tolérancement géométrique, l'assemblage flexible, la fabrication de pièces de formes complexes, la mesure sans contact et le copiage de formes.

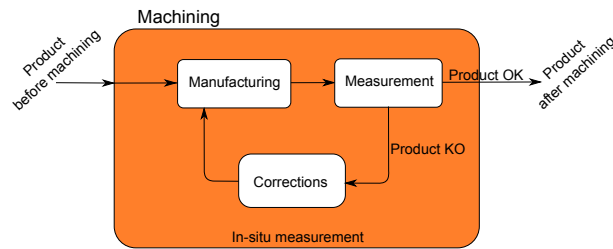


Figure 10 – Contexte de la mesure *in-situ* [Dubreuil et al., 2015]

Mes travaux au sein de l'équipe Geo3D portent sur l'amélioration des procédés de fabrication des pièces de formes complexes par maîtrise de la qualité des surfaces produites. Actuellement, les pièces de formes complexes sont réalisées par des procédés de plus en plus automatisés, à l'aide de machines outil à 5 axes ou de robots. Le processus de fabrication s'appuie sur la définition d'une gamme de fabrication et se décompose en quatre étapes principales, de la définition du cahier des charges au contrôle de la pièce finie [Duc, 2006], [Tournier, 2009]. Dans ce contexte, la définition des paramètres de la stratégie de fabrication est un élément déterminant dans le processus de fabrication : elle détermine les éléments nécessaires au calcul des trajectoires et influe grandement sur le respect des spécifications à respecter sur la pièce réalisée. Il est donc nécessaire de choisir les paramètres de cette stratégie en lien avec la fonctionnalité de la surface à générer. De plus, un autre aspect des contraintes liées à la définition et la modification si besoin de la stratégie de réalisation, concerne l'intégration des opérations de contrôle à ce processus numérique de production. L'une des possibilités envisagées est l'intégration des opérations de mesure au sein du moyen de production (figure 10). Le temps alloué à

la mesure devient alors un élément crucial dans le choix du capteur utilisé. Mes activités de recherche se sont tout particulièrement consacrées à l'utilisation des capteurs sans contact, qui assurent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure. Ainsi, l'originalité des travaux présentés concerne :

- L'étude de la topographie 3D de surface comme intermédiaire entre la fonction et le processus,
- La mesure *in-situ* avec capteur sans contact,
- La définition de stratégie de mesure en contexte *in-situ*.

3.2.1 Étude de la topographie générée par le procédé de fabrication

Une première partie de mes travaux porte particulièrement sur l'analyse de la topographie des surfaces fabriquées, c'est-à-dire aux défauts géométriques d'ordre micrométrique. Le choix des paramètres associés à la stratégie de fabrication doit être effectué en relation avec la fonctionnalité de la surface réalisée (propriétés optiques, tribologiques, mécaniques, etc.). En l'absence de caractérisation directe, un lien entre la fonction et la stratégie employée est la topographie de surface réalisée. Ainsi, la topographie de surface est un élément pivot entre le processus de fabrication et la fonction de la surface fabriquée .

Il est donc nécessaire de prédire la surface générée par le processus de fabrication et d'obtenir une représentation cohérente avec la fonction à évaluer. L'une des difficultés concerne la définition de l'échelle de description permettant de définir des critères ayant la meilleure corrélation avec la fonctionnalité désirée. Dans les travaux présentés, la topographie de surface est donc employée comme intermédiaire entre la fonction à réaliser et le procédé employé. Ces travaux ont été tout particulièrement appliqués au fraisage 5 axes et au polissage automatique.

Topographie en fraisage 5 axes

Mes travaux se sont particulièrement centrés sur la définition de stratégies d'usinage en relation avec la fonctionnalité de la surface à générer. A la suite des travaux doctoraux, un paramètre d'état de surface lié à la stratégie d'usinage dans le cas d'une opération de fraisage 3 axes a été proposé [11]. En s'appuyant sur des modèles de comportement des machines UGV, cette étude a été poursuivie pour les opérations d'usinage 5 axes

avec outil torique en prenant en compte les vitesses d'avance réelles de l'outil [10,25]. Les motifs laissés par ces opérations d'usinage sur la pièce ont pu ainsi être simulés. Ces travaux ont permis d'aboutir à la caractérisation des effets relatifs des paramètres de la stratégie d'usinage sur les paramètres d'état de surface et ont montré le poids prépondérant de l'angle de pivotement sur la qualité de la surface générée [9,10]. Ces travaux permettent ainsi de définir les éléments de la stratégie d'usinage au regard des paramètres d'état de surface à obtenir. Les relations entre ces paramètres d'état de surface et la fonction sont encore des éléments à définir.

Cette prédiction est basée sur la modélisation géométrique du mouvement enveloppe de l'arête de coupe de l'outil. Cette approche, issue de mes travaux de thèse, est une spécificité que j'ai apportée au sein du LURPA. Ces études, bien que prenant en compte le comportement de la machine outil, utilisent une modélisation de l'arête de coupe sous la forme d'un maillage nominal de l'arête de coupe (Master T. Breteau [Breteau, 2006]). Or, lors de mesures de topographie obtenues, des motifs répétables d'une échelle inférieure à l'avance à la dent peuvent être observés. Une géométrie plus réaliste de l'outil incluant la rugosité de l'arête de coupe a donc été utilisée pour prédire ces motifs. Ces travaux permettent ainsi d'étudier la prépondérance des effets géométriques sur le processus d'enlèvement de matière [7].

Polissage

Ces relations entre les paramètres opératoires du procédé et la surface générée ont aussi été explorées pour des opérations de polissage et de prépolissage [24]. Malgré des avantages en termes de répétabilité, de productivité et de qualité géométrique, les méthodes de polissage automatique sont peu utilisées, car elles nécessitent une mise au point importante. Les travaux de recherche entrepris participent à la maîtrise du procédé de polissage automatique tout en contrôlant la qualité géométrique des pièces réalisées [4,33]. L'obtention d'une abrasion homogène sur toute la surface nécessite de contrôler ou de maîtriser le contact, les variations du pouvoir abrasif et la trajectoire. Les recherches développées sur la modélisation du pouvoir abrasif, lors de la thèse d'A. Guiot ont permis la mise en place d'un simulateur d'enlèvement de matière pour les opérations de prépolissage afin de prédire les défauts et ainsi adapter les paramètres de la stratégie de polissage.

Lien avec la fonction/recherche de l'échelle de description pertinente

Dans le cadre de la réalisation de pièce mécanique en usinage par enlèvement de matière, de nombreuses études s'attachent à faire le lien entre intégrité de surface et tenue en fatigue [Novovic et al., 2004]. Il est en effet généralement admis que la limite d'endurance des pièces mécaniques est fortement dépendante de l'intégrité de surface, c'est-à-dire de l'état de contraintes mécaniquement induit, de la micro-géométrie 3D de surface et de la microstructure. Lorsque les contraintes résiduelles sont faibles, l'état de surface devient alors le paramètre prédominant. Certains travaux ont en particulier mis en évidence que la limite d'endurance, pour les pièces obtenues en fraisage, diminuait lorsque l'état de surface était dégradé vis-à-vis d'un état de référence poli. Des modèles probabilistes considérant une loi de distribution des défauts de surface permettent de corréler ces défauts à la résistance en fatigue [Souto-Lebel et al., 2011]. Afin de déterminer l'échelle pertinente d'analyse, nous avons entamé une collaboration avec le professeur C. Brown directeur du Surface Metrology Lab de Worcester Polytechnic Institute. Une très bonne corrélation a ainsi pu être trouvée entre la courbure moyenne des profils extraits sur une surface usinée et la limite d'endurance pour une échelle d'analyse équivalente à l'avance à la dent [22].

3.2.2 Mesure *in-situ*

La surveillance des procédés de fabrication est un enjeu important pour le contrôle des coûts de production et la qualité des pièces fabriquées. De plus en plus, les procédures d'inspection sont intégrées au processus de fabrication. Cela permet en effet des gains significatifs comme la rapidité d'inspection, la flexibilité de mesure, l'inspection *in-situ* en cours de processus (sans démontage de la pièce) ou encore la possibilité d'une inspection à 100% [Vacharanukul and Mekid, 2005]. La mesure *in-situ* permet en particulier une prise de décision rapide sur la conformité de la pièce réalisée, la mesure étant réalisée lors de la même phase que l'opération de fabrication.

Ce contexte particulier de mesure est un élément identitaire de mes travaux et celui-ci nécessite la qualification des capteurs employés pour des environnements de mesure et des porteurs non conventionnels, la gestion des gammes de contrôle ainsi que la mise au point d'outil de pré-mesure permettant de limiter le temps d'immobilisation du moyen de production.

Intégration capteur

L'un des points clés de l'intégration de capteur sans contact dans un environnement de machine outil ou de ligne de production concerne l'étude de la capacité de mesure de ces capteurs sans contact, c'est-à-dire la mise en relation des caractéristiques des défauts à évaluer aux caractéristiques des capteurs. Les défauts géométriques des pièces et/ou des assemblages sont de différentes natures et de différentes échelles. Les capteurs sans contact utilisés pour la numérisation sont de technologie et de capacité de mesure variées (laser plan, projection de franges, capteur confocal, etc.). Compte tenu de cette diversité, il devient essentiel de faire le lien entre le capteur et sa capacité à mesurer des défauts.

Ainsi l'étude de la capacité des moyens de mesure sans contact vis-à-vis d'application de contrôle comme l'équilibrage a été réalisée [23,32]. Cette étude est basée sur la mise en place d'un protocole d'évaluation adapté à ces systèmes de mesure. Dans un contexte de polissage automatique, la qualification de l'intégration d'un capteur chromatique confocal dans une machine outil a permis de démontrer la possibilité de surveiller les opérations de prépolissage [8]. En complément de ces travaux, un **G**roupe de **R**éflexion des **I**ndustriels sur la **M**esure **S**ans **C**ontact (**GRIMSC**) a été mis en place. Ce groupe que je co-anime avec C. Lartigue, comprend SNECMA, Airbus Group, Dassault Aviation, Aircelle. Il a pour objectif de faire émerger les problématiques liées à la capacité des systèmes de mesure sans contact et ainsi qu'à leurs utilisations en contexte industriel.

De façon plus générale, une évaluation de la capacité de différents moyens de mesure pour l'identification de défauts induits par l'usinage a été entamée [19]. Ces travaux s'orientent sur la mise au point de gamme de contrôle multi-capteurs/multi-échelles en contexte *in-situ* en proposant une méthode d'association capteur/défaut. Les macro-défauts (et/ou les défauts d'aspect) peuvent être très rapidement localisés à l'aide d'un système de stéréovision à base de caméras directement implantées dans la machine-outil. La localisation des défauts, objet des travaux de thèse de L. Dubreuil, sert alors de support pour la définition d'une trajectoire de mesure à incertitude maîtrisée afin de contrôler l'erreur de mesure. En parallèle de ces études, une méthodologie de sélection de capteurs, basée sur des indicateurs de qualité vis-à-vis d'une application donnée a pu être mise en place [2].

Construction de gammes de mesure en contexte *in situ*

L'intégration des procédures de contrôle au sein du procédé de fabrication contribue grandement à l'automatisation du processus de production. La mesure *in-situ* permet en particulier une prise de décision rapide vis-à-vis de la conformité du produit réalisé. Néanmoins, les gains ne peuvent être opérants que dans le cas d'une grande interopérabilité entre la fabrication et le contrôle ainsi qu'une très bonne maîtrise des échanges de données. Une des difficultés de la définition des gammes de contrôle en contexte *in-situ* concerne l'association des gammes de fabrication et de contrôle, c'est-à-dire comment insérer de façon optimale les opérations de mesure en cours de fabrication sans pour autant augmenter de façon significative les temps de fabrication.

Une modélisation des éléments nécessaires à la réalisation des gammes de contrôle et de fabrication est proposée dans les travaux de thèse de L. Dubreuil. Cette modélisation de type SysML montre la simplification de la gestion des données dans le cas d'une mesure *in-situ*.

Apport de la vision comme outil d'interopérabilité entre les gammes d'usinage et de mesure

L'un des points pénalisant des opérations de mesure en contexte *in-situ* concerne le temps de mesure. En effet, afin de maintenir un temps global de production acceptable, le temps alloué à la réalisation de l'opération de mesure ainsi qu'à l'analyse des résultats ne peut être que très réduit. En ce sens, l'utilisation d'un système de vision calibré dans un référentiel lié à la FAO peut être un outil pertinent pour la détection de défauts d'usinage. Une méthode de calibration basée sur la reconnaissance d'entités du montage d'usinage et permettant le passage entre le repère lié à l'image et celui du modèle FAO a ainsi été élaborée [3]. Il est ensuite possible par corrélation d'images de détecter directement les zones présentant un écart, par rapport à la pièce définie dans le modèle FAO, supérieur aux erreurs de calibration.

3.2.3 Stratégie de numérisation et numérisation minimale

Stratégie de numérisation

Nous avons par ailleurs proposé, pour les objets dont le modèle CAO est connu, une méthode pour le calcul des configurations capteur/pièce adaptable à différents cap-

teurs, car s'appuyant sur les caractéristiques dimensionnelles de la fenêtre de mesure. Les travaux menés ont abouti à la définition d'une méthode basée sur une représentation simplifiée des pièces sous forme de voxel-maps. Cette méthode s'appuie sur l'identification des visibilités à incertitude maîtrisée. La taille de la fenêtre de vue du capteur définit la taille du voxel, c'est-à-dire le niveau d'approximation de la surface, pour lequel une configuration capteur est définie. Cette méthode permet l'identification d'un ensemble réduit de points de vue qui constitue la trajectoire de numérisation. Elle a été appliquée avec succès pour la recherche d'une stratégie de mesure adaptée à l'équilibrage de vilebrequin par mesure de géométrie externe [6].

Numérisation minimale

Nos travaux s'orientent vers la proposition de stratégies de numérisation dites a minima. Il n'est pas toujours nécessaire, souvent afin de minimiser les temps de numérisation, ou possible, en raison des problèmes d'accessibilité capteur/pièce, de numériser la totalité de la géométrie des surfaces constituant une pièce. Il en résulte alors des lacunes de numérisation qui peuvent être pénalisantes pour l'exploitation du nuage de points. C'est le cas par exemple lorsque l'on souhaite effectuer l'équilibrage de vilebrequins par mesure de géométrie externe [23]. Dans cette optique, les travaux envisagés visent à déterminer l'ensemble de points de vue réduit qui permet l'exploitation du nuage de points ou des données numérisées. En fonction de l'application, il s'agit de mettre en relation points de vue et grandeurs caractéristiques à évaluer. Ces études se poursuivent sur la génération des trajectoires de mesure sur MOCN 5 axes dans le cadre de la thèse de D. M. Phan.

En parallèle de ces travaux, une réflexion est menée sur la complétude du nuage de points numérisés vis-à-vis de la représentativité de la forme. Il n'est en effet pas toujours nécessaire (afin de minimiser les temps de numérisation), ou possible (en raison des problèmes d'accessibilité capteur/pièce), de numériser la totalité de la géométrie des surfaces constituant une pièce. Le problème qui est posé est d'assurer une connaissance suffisante de la géométrie mesurée pour une application donnée. Afin, d'assurer la complétude du nuage de points vis-à-vis de la forme nominale, nous avons proposé une méthode de remplissage des zones non numérisées, correspondant à des lacunes de numérisation [5]. Basée sur une connaissance a priori du modèle nominal, cette méthode s'appuie sur des techniques de déformation par minimisation d'énergie. Elle a pour prin-

cipal intérêt d'assurer un respect des formes à travers la gestion de la continuité des courbures [5].

Numérisation globale et gestion de la maquette numérique

Enfin, une dernière partie des travaux réalisés porte sur la mise au point de stratégies de numérisation globale par stéréo-corrélation d'images. A partir d'une représentation de la pièce nominale à mesurer sous la forme d'un maillage triangulaire, il a été proposé d'identifier la pièce réelle à mesurer par déformation de ce maillage afin de minimiser un résidu de corrélation [1]. Le nombre de degrés de liberté de cette déformation est maîtrisé par le fait de limiter le déplacement des nœuds uniquement selon la normale locale. Le résultat de mesure est donc un maillage de structure identique au maillage de la pièce nominale.

Ainsi, par la méthode de gestion des trous de numérisation [5] ou par celle de numérisation globale, il est possible d'obtenir un résultat de numérisation dans un format de représentation directement cohérent avec celui de la pièce nominale. Ceci permet d'envisager plus facilement les applications utilisant ces résultats (segmentation du résultat de mesure, métrologie, etc.). L'apport principal de cette méthode est ainsi d'intégrer directement le résultat de mesure dans la chaîne numérique de conception et de fabrication de la pièce.

3.2.4 Perspectives

Les orientations futures de ces travaux peuvent être regroupées selon trois thèmes principaux : l'analyse des formes internes, l'amélioration du temps de traitement des données acquises et le suivi de la maquette numérique. Le premier thème est motivé par une évolution des procédés de fabrication et de mesure. Il s'agit de mettre en relation les paramètres de remplissage des formes internes en fabrication additive avec l'analyse des données issues de tomographie. Le deuxième thème concerne l'amélioration du temps de traitement des données acquises. L'idée originale proposée est de mettre au point un système de mesure ne délivrant plus une information dimensionnelle, mais une information directement liée à une base de défaut. Enfin, le dernier thème, correspondant à des projets à plus long terme, porte sur le suivi de la maquette numérique et en particulier du modèle FAO, c'est-à-dire sur le modèle comprenant à la fois la géométrie nominale,

mais aussi les états intermédiaires de la pièce ainsi que les trajectoires.

3.3 Encadrement et animation

Responsable de l'équipe Géo3D depuis janvier 2014. L'équipe Géo3D est composée de 11 permanents, 11 doctorants et 6 étudiants de master (effectif au 01/01/2016). Elle dispose d'un budget d'environ 100 k€/an. Cette responsabilité consiste à assurer la gestion et le suivi des différents projets de l'équipe. Il s'agit aussi d'assurer l'animation scientifique de l'équipe. J'ai pour cela mis en place des séminaires de chercheurs seniors afin d'aider à la formalisation de travaux et aussi de doctorants afin de préparer les conférences internationales.

11 Masters encadrés

- S. Zeriouh** Filling holes with a priori knowledge of CAD model for point cloud exploitation. Mémoire du Master, ENS Cachan - Arts et Métiers Paritech, 48 p., septembre 2015.
- L. Grandguillaume** Définition de stratégies d'usinage et de polissage pour la fabrication de moules d'injection de soufflage. Mémoire du Master, ENS Cachan, 64 p., juin 2014.
- V-T. Le** Pré-traitement de nuage de points. Application au remplissage des données numérisées. Mémoire du Master, ENS Cachan, 60 p., juin 2014.
- L. Dubreuil** Comparaison de protocoles de mesure sans contact pour l'évaluation de défauts d'usinage. Mémoire de Master, ENS Cachan, 42 p., juin 2013.
- V. Simoes** Repérage et recalage de vilebrequins bruts sur un nuage de points par photogrammétrie. Mémoire de Master, ENS Cachan, 55 p., juin 2012.
- A. Houet** Equilibrage virtuel de vilebrequins par photogrammétrie. Mémoire de Master, ENS Cachan, 38 p., Juin 2011.
- N. Audfray** Numérisation intelligente basée sur des critères qualité. Mémoire de Master, ENS Cachan, 52 p., Juin 2009.
- R. Costadoat** Implantation d'un capteur Stil dans une cellule de mesure multi-capteurs. Mémoire de Master, ENS Cachan, 60 p., Juin 2007.
- T. Breteau** Modélisation géométrique et analyse de la surface générée en fraisage 5-Axes. ENS Cachan, 54 p., juin 2006.

P.-Y. Pechard Usinage de pièces de formes complexes : méthode de choix de stratégie d'usinage U.G.V. Mémoire de Master, ENS Cachan, 37 p., juin 2006.

M. Makki Influence de la géométrie d'une entité de forme complexe et du mode d'usinage sur la réalisation d'outillage. Mémoire de Master, ENS Cachan, 30 p., 2005.

2 Thèses co-encadrées soutenues :

A. Guiot Modélisation et simulation du procédé de prépolissage automatique sur centre d'usinage 5 axes. Soutenue le 6.12.2012. Directeur de thèse Christophe Tournier. Co-encadrement 50%.

A. Zuquete Guarato Equilibrage de vilebrequin par mesure sans contact. Soutenue le 11.12.2013. Directeur de thèse Claire Lartigue. Co-encadrement 35% avec C. Medhi-Souzani 35%.

2 Thèses co-encadrées en cours :

L. Dubreuil , Métrologie *in-situ* par moyens optiques. Début septembre 2013. Directeur de thèse Claire Lartigue. Co-encadrement 70%.

D. M. Phan Nguyen , Trajectoires de numérisation adaptatives en contexte *in-situ*. Début septembre 2015. Directeur de thèse Claire Lartigue. Co-encadrement 70%.

3.4 Collaboration Internationale

Professeur C. Brown de Worcester Polytechnic Institute : Recherche des échelles pertinentes d'analyse pour les relations entre la topographie 3D des surfaces, le procédé de réalisation et la tenue en fatigue.

Séjours : Professeur invité ENS Cachan (1 mois septembre 2013), Séjour Digitéo (1 semaine janvier 2013)

Echanges d'étudiants : 3 stagiaires de M1 accueillis à WPI

Publications : 1 publication en revue [7], 2 conférences internationales [15,20]

3.5 Collaboration Industrielle

Renault (sept. 2010 - sept. 2013) : Equilibrage de vilebrequin par mesure sans contact
– Accompagnement contrat Cifre - Montant de 60 k€

Messier-Bugatti-Dowtti (jan. 2013 - juin 2013) : Comparaison de protocoles de mesure sans contact pour l'évaluation de défauts d'usinage – Contrat de recherche en collaboration avec le LMT ENS cachan (F. Hild) - Responsable scientifique pour le LURPA - Montant de 10 k€

SIDEL (jan. 2014 - juin 2014) : Definition de strategies d'usinage et de polissage pour la fabrication de moules d'injection de soufflage – Contrat de recherche - Montant 10k€

Sunoptics (jan. 2008 - sept. 2008) : Etude de l'usinage de moule pour masque de Ski - Masque MBS - Contrat de recherche - Montant 2k€

3.6 Rayonnement

Co-organisateur de la journée AIP-Primeca Mesure des formes. Décembre 2016

Co-organisateur de la journée AIP-Primeca Mesure 3D sans contact. Juin 2012

Co-animateur du GRIMSC : Groupe de Réflexion des Industriels sur la Mesure Sans Contact constitué de Snecma, Airbus Group, Dassault Aviation, Aircelle

Participation au groupe Manufacturing 21

Rapporteur revue/conférence : International Journal of Advanced Manufacturing Technology 1 review ; international conference connecting people in CAD research, education and business CAD&A 2016 2 reviews

4 Publications

4.1 Revues internationales à comité de lecture

- [1] L. Dubreuil, J.-E. Dufour, Y. Quinsat, F. Hild, Mesh-Based Shape Measurements with Stereocorrelation. Principle and First Results, *Experimental Mechanics*. DOI 10.1007/s11340-016-0158-x. 2016.
- [2] C. Mehdi-Souzani, Y. Quinsat, C. Lartigue, P. Bourdet, A knowledge database of qualified digitizing systems for the selection of the best system according to the application, *Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 13, pp. 15–23 2016.
- [3] L. Dubreuil, Y. Quinsat, C. Lartigue, Calibration based on part set-up measurement for on-machine inspection using vision, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Vol. 9, pp. 317-323, 2015.
- [4] Y. Quinsat, A. Guyot, C. Tournier, Tool wear modeling for constant removal rate in two-bodies automated polishing, *International Journal of Abrasive Technologie*, Vol. 7, pp. 73-88, 2015.
- [5] Y. Quinsat, C. Lartigue, Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, pp. 411-421, 2015.
- [6] C. Lartigue, Y. Quinsat, C. Mehdi-Souzani, A. Zuquete Guarato, S. Tabibian, Voxel-based path planning for 3D scanning of mechanical parts, *Computer-Aided Design and Applications, CAD Solutions*, Vol. 11, issue 2 pp.220-227, 2014.
- [7] S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue, C. Brown, Realistic simulation of surface defects in 5-axis milling using the measured geometry of the tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, pp. 393-401, 2014.
- [8] Y. Quinsat, C. Tournier, In situ non-contact measurements of surface roughness, *Precision Engineering* Vol. 36 pp. 97-103, 2012.
- [9] Y. Quinsat, S. Lavernhe, C. Lartigue, Characterization of 3D surface topography in 5 axis milling, *Wear*, Vol. 271, Issues 3-4, pp. 590-595, 2011.
- [10] S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue, Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, pp 915-924, 2010.
- [11] Y. Quinsat, L. Sabourin, C. Lartigue, Surface topography in ball end milling process : Description of a 3D surface roughness parameter, *Journal of Materials Processing*

Technology, Vol. 195, pp. 135–143, 2008.

[12] Y. Quinsat, L. Sabourin, Optimal selection of machining direction for 3 axis milling of sculptured parts, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 27 pp 1132-1139, 2006.

4.2 Autres Revues

[13] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, Method to define machining Strategy, Machine Engineering, Vol. 4, pp. 60-69, 2004.

[14] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, Optimization of the non-cutting tool-path in multi-workpiece configurations, Machine Engineering, Vol. 4, pp 263-272, 2004.

4.3 Conférences internationales avec comité de lecture soumises

[15] Y. Quinsat, C. Lartigue, C. A. Brown, L. Hattali, L., Multi-scale surface characterization in additive manufacturing using CT, Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing, Catane, September 2016.

[16] M. P. Nguyen Duy, Y. Quinsat, C. Lartigue, Simulation of laser-sensor digitizing for on-machine part inspection Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing, Catane, September 2016.

4.4 Conférences internationales avec comité de lecture

[17] L. Dubreuil, Y. Quinsat, C. Lartigue, CAD-based calibration for on-machine measurement using vision, CAD and A, London (Angleterre), 22-25 June 2015.

[18] L. Grandguillaume, S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Tournier, Mold manufacturing optimization : a global approach of milling and polishing processes, 15th CIRP Conference On Modelling Of Machining Operations, Karlsruhe, 11-12 June 2015.

[19] L. Dubreuil, Y. Quinsat, C. Lartigue, Multi-sensor approach for multi-scale machining defect detection, International Conference on Mechanical Design Engineering and Advanced Manufacturing, Toulouse , 18-20 June 2014.

[20] M. Vulliez, M. Gleason, A. Souto-Lebel, Y. Quinsat, C. Lartigue, S. Kordell, A. Lemoine, C. A. Brown, Multi-scale curvature analysis and correlations with the fatigue

limit on steel surfaces after milling, 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI) 28th-30th May 2014.

[21] Y. Quinsat, C. Tournier, In situ non-contact measurements of polished surfaces, The third International Conference on Surface Metrology, Annecy (France) 21-23 March 2012.

[22] C. Tournier, C. Iabassene, A. Guiot, Y. Quinsat, Grinding of Medical Implants in Cobalt-Chromium alloy, 1st International Conference on Design and PROcesses for MEDical Devices, Brescia (Italy), pp.95-98, May 2012.

[23] A. Zuquete-guarato, C. Mehdi-Souzani, Y. Quinsat, C. Lartigue, L. Sabrie, Towards a new concept of in-line crankshaft balancing by contact less measurement : process for selecting the best digitizing system, 11th Biennial Conference on Engineering Systems and Design Analysis ASME ESDA 2012, Nantes (France), July 2-4th, 2012.

[24] Y. Quinsat, S. Lavernhe, C. Lartigue, Characterization of 3D surface topography in 5 axis milling, 12 th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Rzeszow 8-10 juillet 2009.

[25] S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue, R. Meyer, NC-simulation for the prediction of surface finish in 5-axis High-Speed Machining, 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting, Dublin(Ireland), Vol 1, pp 387 - 396, 12-13 June 2008.

[26] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, Directional beam based approached applied to the choice of machining direction for sculptured part , In : Perspectives from Europe and Asia on Engineering Design and Manufacture, 2004, Ed : X. -T Yan, C. -Y. Jiang et N. P. Juster. Kluwer Academic Publishers, pp. 373-382.

[27] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, Help for sculptured surface machining strategy choice : application to finishing process, Current Advances in Mechanical Design and Production. MDP 8, Egypt, Cairo, pp. 1023-1032, 2004.

[28] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, Machining direction choice : application for finishing of sculptured part, IDMME 04, Bath, Angleterre, CD-ROM Paper n°236, 2004.

[29] Joseph Pegna, Raphael Bergé, Stéphane Pattofato, Yann Quinsat, Myriam Terrier, Experimental Characterization of Powder Flow and Deposition of a Vibratory L-Valve , IDMME 00, Montreal, Canada, 2000.

4.5 Conférences nationales avec comité de lecture.

- [30] L. Dubreuil, Y. Quinsat, C. Lartigue, Calibration sur modèle CAO pour la mesure par vision in-situ, 15ème Colloque AIP PRIMECA, LA Plagne, Mars 2015.
- [31] L. Grandguillaume, Y. Quinsat, S. Lavernhe, C. Tournier, Optimisation de la fabrication de moule : Une approche globale des procédés de fraisage et de polissage, 15ème Colloque AIP PRIMECA, LA Plagne, Mars 2015.
- [32] A. Zuquete-guarato, Y. Quinsat, C. Mehdi-Souzani, C. Lartigue, Détermination de la qualité de numérisation pour l'équilibrage de vilebrequins, 13ème Colloque AIP PRIMECA, Mont Dore, Mars 2012.
- [33] A. Guiot, C. Tournier, Y. Quinsat, Modélisation de l'usure des abrasifs pour garantir la qualité des surfaces polies, 13ème Colloque National AIP PRIMECA, Mont-Dore (France), Mars 2012.
- [34] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, Aide au choix de stratégie d'usinage, application à la finition des pièces de formes complexes, Congrès Français de Mécanique, Nice, CD-ROM Paper n°330, 2003.
- [35] Y. Quinsat, L. Sabourin, G. Gogu, CPI 03, Aide au Choix de Stratégie d'usinage, étude de l'état de surface, Méknès, Maroc, CD-ROM Paper n°95, 2003.

4.6 Travaux universitaires

- [36] Y. Quinsat, Contribution au choix de stratégies d'usinage : application à la finition des pièces de formes complexe, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, octobre 2004.
- [37] Y. Quinsat, Optimisation Multi-Critères par les Algorithmes Génétiques. Application à l'optimisation des trajectoires outils en contexte d'usinage Multi-pièces, DEA, Université Blaise Pascal, juin 2001.

Deuxième partie

Travaux de Recherche

Introduction

Cette partie présente le bilan de mes activités de recherche post-doctorat, depuis ma soutenance de thèse en 2004 jusqu'à aujourd'hui. Ces travaux sont le fruit d'une curiosité, celle de pouvoir mesurer avec de la lumière, associée à la volonté de rester au plus près du moyen de production. Ce sont ces deux éléments qui m'ont orienté vers l'étude des problématiques de mesure dans un environnement de machine-outil avec des systèmes optiques.

À la lecture de ce document, il sera facile d'observer que ma recherche a été influencé par un tropisme tendant vers l'augmentation de la dimension des données mesurées : un point, une ligne, une image, un volume. Cette tendance naturelle est finalement à l'origine des motivations scientifiques quant aux travaux relatifs à la construction de gammes de mesure multi-capteurs/multi-échelle.

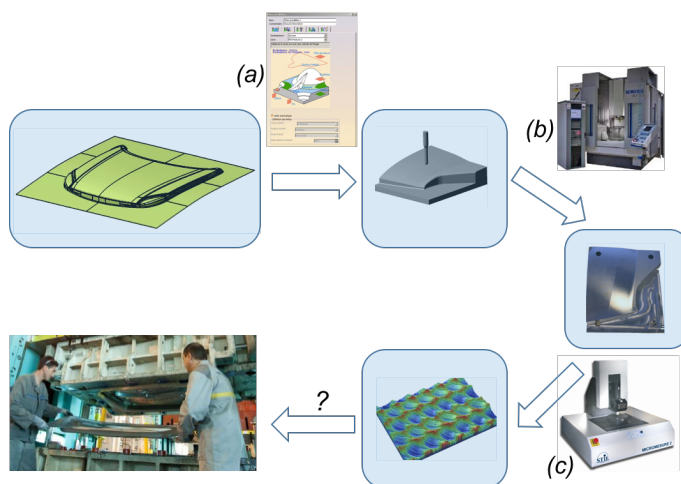


Figure 11 – Présentation du contexte des travaux

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration et la maîtrise de la qualité des surfaces fabriquées. La réalisation de ces surfaces nécessite dans un premier temps (étape (a) à la figure 11) la définition des paramètres de la stratégie d'usinage nécessaires au calcul des trajectoires d'usinage. Celles-ci sont ensuite exécutées sur un centre d'usinage (étape (b) à la figure 11). Enfin, la surface est mesurée (étape (c) à la figure 11) et c'est

sur la base de cette mesure qu'est vérifiée sa conformité vis-à-vis de la fonction à assurer.

Ainsi, dans ce contexte les travaux présentés dans cette partie ont pour objectif d'aider au choix des paramètres de la stratégie d'usinage vis-à-vis de la fonction que doit réaliser la surface fabriquée. Un deuxième objectif concerne la fusion des deux dernières étapes ((b) et (c)) et ainsi l'intégration des opérations de mesure au sein du système de production. Enfin, le dernier objectif concerne l'amélioration de la troisième étape (étape (c)).

J'ai choisi de découper cette partie en trois chapitres distincts ainsi qu'un chapitre de perspectives :

- Étude de la topographie générée par le procédé de fabrication,
- Mesure *in-situ*,
- Stratégie de numérisation en contexte *in-situ*.

Ce choix est motivé par l'envie de clairement distinguer les réflexions menées sur la modélisation des procédés de fabrication et des opérations de mesures, de la mesure elle-même.

Le premier chapitre, portant sur la modélisation de la topographie de surfaces obtenues en usinage et polissage, décrit mes propositions afin de considérer cette topographie comme élément pivot entre la fonction désirée de la surface et les paramètres pilotant le procédé. Ce positionnement original, ainsi que le processus de modélisation employé, sont les éléments identitaires de mes travaux dans le domaine.

Le cadre de la mesure *in-situ* est le thème central du deuxième chapitre. La particularité de mes travaux dans ce domaine est d'orienter les réflexions sur la planification des opérations de mesure vers l'utilisation de plusieurs capteurs en fonction de l'échelle du défaut à mesurer. Cette approche multi-capteurs/multi-échelle conduit aux problématiques d'intégration et de sélection des différents capteurs ainsi qu'à l'étude de l'interopérabilité entre les différentes données acquises et la maquette numérique.

Le troisième chapitre est consacré à l'activité de mesure et au traitement des données qui en découle. Pour répondre à la diminution des temps d'acquisition et d'intégration des résultats de mesure, les études dans ce domaine portent à la fois sur la stratégie de mesure elle-même, mais aussi sur la complétude des données acquises et la mise au point d'un nouveau système de mesure. L'utilisation de la maquette numérique sous une même forme facettisée, adaptée à la représentation de défauts locaux et aux modèles

usines simulés, pour ces trois activités est une spécificité des travaux présentés.

Enfin, les perspectives pour l'ensemble des activités sont rassemblées dans un quatrième chapitre, ouvrant les orientations des travaux à venir.

Chapitre 1

Etude de la topographie générée par le procédé de fabrication

Les travaux présentés dans ce chapitre portent sur la topographie des surfaces fabriquées. Le parti pris est de considérer la topographie de surface comme un élément central entre la stratégie pilotant le procédé et la fonction à réaliser par la surface. Il a donc été choisi de réaliser et d'étudier la prédiction des surfaces générées, par un procédé de fraisage, à une échelle micro-métrique qui permet d'obtenir une représentation cohérente avec la fonction à évaluer. Il est ainsi possible de mettre en place des outils permettant la mise en relation de la fonction de la surface avec la stratégie d'usinage. Après une introduction précisant le contexte des travaux, ce chapitre décrit dans une première partie le principe de simulation employé, ainsi que les évolutions successivement réalisées. Dans une deuxième partie, différentes applications illustrant les relations "fonction à réaliser" et "procédé d'obtention" sont présentées. Enfin dans un dernier temps, ces travaux sont étendus au procédé de polissage.

Sommaire

1	Introduction	41
2	Prédiction de l'état de surface obtenu en fraisage	44
2.1	État de l'art	44
2.2	Principe de simulation employé [Quinsat et al., 2008]	46
2.3	Évolutions de la simulation	47
2.3.1	Modélisation de l'outil [Breteau, 2006]	48
2.3.2	Prise en compte du comportement machine [Lavernhe et al., 2010]	49
2.4	Limite géométrique de la simulation [Lavernhe et al., 2014]	50
3	Étude des relations entre la stratégie d'usinage et la fonction à réaliser	52
3.1	Apport de l'étude de la topographie de surface sur l'optimisation du processus	52
3.2	Relation avec les paramètres fonctionnels [Lavernhe et al., 2010, Quinsat et al., 2011]	54
3.3	Intégrité de surface [Vulliez et al., 2014]	56
4	Maîtrise de la qualité des surfaces en polissage [Guiot, 2012, Quinsat et al., 2015]	58
4.1	Principe	59
4.2	Stratégie de polissage à taux d'enlèvement de matière constant	61
5	Conclusion	64

1 Introduction

La topographie des surfaces manufacturées est un élément déterminant quant à la bonne réalisation de la fonction de service associée. En effet, la surface extérieure d'une pièce est l'interface de divers phénomènes physiques, optiques et mécaniques. À titre d'exemple, il est possible de citer les phénomènes de réflexion en optique ou de frottement en tribologie. Par conséquent, les relations (figure 1.1) entre les procédés d'obtention, leurs propriétés et les usages possibles des surfaces sont nombreuses et complexes. [Bruzzone et al., 2008]. Les travaux de recherche sur les états de surface sont souvent divisés en 3 domaines [Thomas, 2014] :

- mesure,
- caractérisation,
- application.

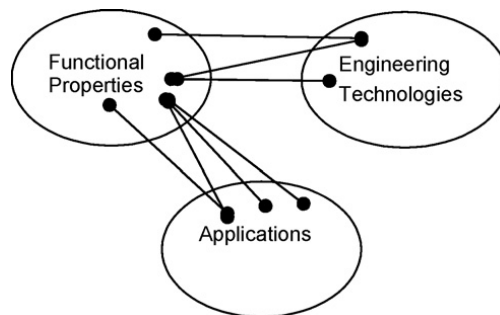


Figure 1.1 – Liens entre fonction-applications-procédé [Bruzzone et al., 2008]

Actuellement, le domaine le plus étudié concerne celui lié aux applications [Thomas, 2014]. Les travaux identifiés comme tels permettent de mettre en relation un état de surface avec un emploi particulier de la surface générée comme l'étude de la cavitation d'aube de propulseur marin [Brient, 2004], le frottement dans des servo-valves [Saravananakumar et al., 2009] ou encore la tenue en fatigue des pièces produites [Novovic et al., 2004, Guillemot, 2010, Souto-Lebel, 2014], . D'autres exemples de relation entre l'état de surface et la fonction sont présentés par Thomas [Thomas, 2014]. Le fait que le domaine présentant le plus de travaux concerne les applications est principalement dû à la difficulté de décrire correctement les liens entre la fonction à réaliser et la topographie, c'est à dire entre le bon fonctionnement de la surface réalisée pour une application donnée et la topographie de cette dernière.

Géométriquement, la topographie des surfaces est définie simultanément pas deux éléments, l'amplitude dans la direction normale à la surface et la périodicité des motifs [Thomas, 2014]. La caractérisation de ces deux phénomènes est nécessaire pour décrire correctement la rugosité induite. D'un point de vue normalisation, la caractérisation des états de surface peut être réalisée en trois dimensions [Iso 25178-2, 2012], permettant ainsi de prendre en compte l'aspect multidirectionnel de la topographie d'une surface. Ces paramètres d'état de surface constituent un outil supplémentaire permettant de caractériser la topographie de surface et ainsi d'essayer de lier l'état de surface à la fonction à réaliser. À titre d'exemple, Whitehouse [Whitehouse, 2001, Whitehouse, 2009], dans le cadre de l'étude du contact entre deux pièces, propose de classer les différentes applications liées à la surface ainsi que les paramètres d'état de surface associés à partir de la distance entre les deux surfaces et leurs vitesses relatives 1.2.

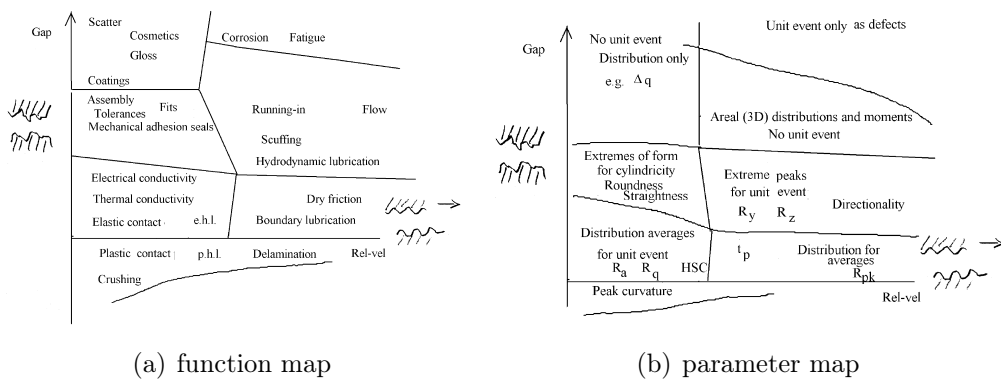


Figure 1.2 – Liens entre fonction-topographie-procédé [Whitehouse, 2001]

D'autre part, la géométrie de la surface réalisée est fortement dépendante du procédé de fabrication employé et du réglage de ses paramètres pilotants. En effet, la qualité de la surface fabriquée dépendra d'une sélection adéquate des paramètres du procédé. Par conséquent, le choix des paramètres définissant le procédé impacte directement le respect des fonctions de service désirées. En l'absence de relation directe entre le procédé de fabrication et la fonction à réaliser permettant le réglage et l'optimisation des paramètres pilotants, la topographie de surface devient alors l'élément pivot entre le procédé et l'utilisation finale.

Les travaux réalisés concernent donc la prédiction et l'étude des surfaces générées par les processus de fabrication. L'objectif est d'obtenir une représentation cohérente de la topographie en fonction des paramètres pilotant le procédé, permettant l'évaluation de la fonction à réaliser, ou tout au moins l'évaluation de paramètres d'état de surface, ainsi que l'optimisation des paramètres du procédé. La topographie de surface est donc employée comme intermédiaire entre la fonction à réaliser et le procédé employé. Ces travaux sont plus particulièrement centrés sur le procédé de fraisage. Il s'agit alors de mettre en relation la stratégie d'usinage avec la topographie générée. Nous considérons dans ces travaux la stratégie d'usinage comme l'élément permettant la définition d'une opération ou d'un ensemble d'opérations d'usinage et pour chacune d'elles, elle caractérise :

- un ou des outils de coupe (diamètre, etc.),
- les paramètres nécessaires à la construction des trajets outils (mode de génération, pas transversal, etc.),
- des paramètres technologiques (vitesse d'avance, profondeur de passe, vitesse de coupe, épaisseur du copeau, etc.).

Ces travaux se sont appuyés pleinement sur les moyens expérimentaux du LURPA, plus particulièrement sur le centre d'usinage grande vitesse Mikron UCP710 ainsi que sur la station de micromesure STIL équipée d'un capteur chromatique confocal de 100 μm de plage de mesure.

Une première partie sera consacrée à la prédiction des topographies de surface dans le cadre de l'usinage des pièces de formes complexes. L'influence des paramètres de la stratégie d'usinage sur l'état de surface est ainsi déterminée. À partir de cette prédiction et de l'analyse des topographies usinées, des relations entre les paramètres de la stratégie d'usinage et des indicateurs de la fonctionnalité de la surface sont établies dans une deuxième partie. Enfin, dans une troisième partie ces travaux sont étendus au procédé de polissage automatisé. Une stratégie de polissage à taux d'enlèvement de matière constant est proposée.

2 Prédiction de l'état de surface obtenu en fraisage

2.1 État de l'art

La prédiction des états de surface est un domaine largement étudié et de nombreux travaux existent afin de qualifier ou d'optimiser les paramètres du procédé de fabrication étudié vis-à-vis d'un état de surface à atteindre. Une première catégorie est composée essentiellement de travaux expérimentaux qui s'attachent à corrélérer la qualité de la surface usinée avec les paramètres de la stratégie d'usinage. La plupart du temps, il s'agit de résultats qualitatifs cherchant à corrélérer la qualité de la surface obtenue avec les paramètres de la stratégie d'usinage. À titre d'exemple, Ramos *et al.* présentent une série de mesures mettant en évidence l'influence de la direction d'usinage sur la qualité de la surface usinée dans le cadre de la réalisation d'une hélice de bateau [A.M. Ramos, 2003]. Kang *et al.* décrivent les différentes topographies obtenues en fonction de l'orientation de l'outil par rapport à la surface usinée [Kang et al., 2001]. À partir d'une analyse de photographies des motifs, l'auteur recommande d'éviter les directions d'usinage remontant ou descendant la surface.

Certains travaux s'attachent à définir une loi expérimentale liant l'état de surface aux paramètres de la stratégie d'usinage. Ainsi, R. Baptista développe un modèle prédisant l'état de surface en fonction de l'avance à la dent et du pas transversal [R. Baptista, 2000]. Ce modèle empirique réalisé dans le cadre de l'usinage d'alliage d'aluminium à l'aide d'un l'outil hémisphérique est limité à un couple outil/matière donné. D'autres travaux enrichissent ce type de modèle par l'ajout de l'influence de la géométrie de la surface usinée comme l'orientation de la normale locale [Ko et al., 2001, D.A. Axinte, 2002, Jung et al., 2001]. Plus récemment, Scandiffio *et al.* conduisent des analyses similaires dans le cadre de l'usinage d'alliage d'acier pour moules et matrices [Scandiffio et al., 2015]. Neto *et al.* réalisent une étude similaire sur le même matériau [Kull Neto et al., 2015].

Les différents travaux présentés sont tous basés sur une approche expérimentale, leurs domaines de validité dépendent donc des conditions utilisées (matériaux, outils, plages de variation étudiées). Ces études ne permettent pas une extrapolation aisée des résultats obtenus. En parallèle de ces études expérimentales, d'autres approches géométriques cette fois, s'attachent à prédire les motifs obtenus lors d'une opération d'usinage de surface complexe.

B. H. Kim décrit la texture réalisée par un outil hémisphérique par posage successif de ce dernier le long de la trajectoire. Il s'agit d'un raffinement du calcul de la hauteur de crête par discrétisation de la trajectoire [Kim and Chu, 1999] en fonction de l'avance à la dent. Néanmoins, l'orientation de l'outil n'est pas prise en compte. Ce paramètre est introduit dans les travaux de K. D. Bouzakis [K. D. Bouzakis, 2003] qui se concentre sur le mouvement de l'arête de coupe. Ainsi, la topographie de la surface usinée est simulée en fonction de l'avance à la dent, du pas transversal et de l'orientation de l'outil. Basée sur l'intersection de plans orthogonaux à la vitesse d'avance et l'arête de coupe, la méthode proposée est bien adaptée pour définir la géométrie instantanée du copeau. C.K. Toh complète ces travaux par la définition de la meilleure direction d'usinage sur un plan incliné pour un état de surface donné [Toh, 2004]. J.-S. Chen *et al.* réalisent le même modèle de simulation et mettent en évidence l'influence de l'avance à la dent et de l'orientation de l'outil sur le motif réalisé et la géométrie de la ligne de crête [Chen et al., 2005a, Chen et al., 2005b]. Dans le cadre d'une surface complexe, T. Gao *et al.* modélisent le mouvement de l'arête de coupe et aboutissent à la définition des motifs obtenus pour un outil hémisphérique [Gao et al., 2006]. I. Buj-Corra *et al.* utilisent une méthode de simulation [Buj-Corra et al., 2012] basée non plus sur la discrétisation de l'arête de coupe, mais sur celle du volume de matière à usiner sous la forme d'un Z buffer [Jerard et al., 1989].

Les travaux présentés souffrent d'un manque de généralité dans leurs approches soit parce qu'ils sont liés à un couple outil/matière, à une modélisation de l'outil limité à une géométrie nominale ou à une modélisation de son mouvement ne permettant pas de prendre en compte les spécificités cinématiques du moyen de production.

L'objectif des études menées vise à établir les liens entre le réglage du procédé et la fonction à réaliser. Les éléments proposés dans cette partie s'inscrivent dans la prévision de l'état de surface obtenu en fraisage selon une approche géométrique. Ils s'attachent tout particulièrement à l'obtention d'une topographie 3D cohérente, c'est-à-dire à l'obtention d'une topographie permettant d'étudier les relations entre le réglage du procédé et l'usage de la surface produite. Afin de pouvoir réaliser le lien entre la fonction à réaliser et le procédé, deux éléments sont à envisager. Le premier concerne la modélisation de l'outil utilisé, cette modélisation devant permettre la représentation la plus fidèle possible de la géométrie de l'arête de coupe. Le deuxième concerne la prise en compte de la stratégie d'usinage et de la trajectoire employées.

2.2 Principe de simulation employé [Quinsat et al., 2008]

La prédiction des motifs obtenus lors d'une opération de fraisage repose sur l'étude du mouvement des points de l'arête de coupe. Ce mouvement est le résultat de la combinaison du mouvement de coupe, réalisé par la rotation de l'outil, et du mouvement d'avance. Ces points ont donc une trajectoire complexe assimilable à une trochoïde. La topographie réalisée résulte donc de l'enveloppe des positions atteintes de l'ensemble des points de l'arête de coupe. Il s'agit en fait d'une restriction de cet ensemble aux uniques positions les plus proches de la surface usinée, étant donné que c'est uniquement cette restriction qui laissera la trace définitive sur la pièce. Ainsi le calcul peut être réalisé à l'aide d'une technique de Z-buffer comme développé par Jerard *et al.* [Jerard et al., 1989] enregistrant l'ensemble des positions atteintes, ou par l'étude de brins coupés [Liu and Loftus, 2004].

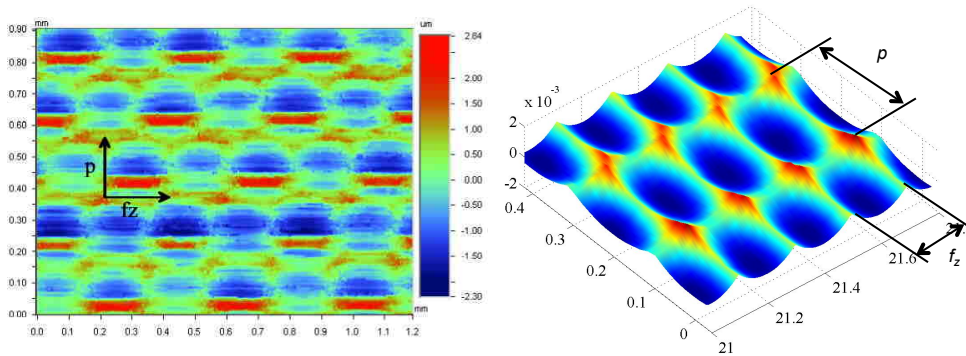


Figure 1.3 – Comparaison entre surface usinée (gauche) et simulée (droite) [Quinsat, 2004]

Les premiers travaux réalisés [Quinsat, 2004, Quinsat et al., 2008] dans le domaine de la simulation de la topographie de la surface usinée ont porté sur l'usinage des surfaces complexes en trois axes à l'aide d'un outil hémisphérique. Ces simulations sont basées sur l'étude du mouvement d'une arête de coupe en fonction de l'orientation de l'outil par rapport à la surface à usiner. L'arête de coupe est considérée comme une courbe plane parfaitement circulaire, et seuls les points de plus faible altitude laissent une trace définitive sur la pièce. Afin de pouvoir réaliser un motif complet, il n'est pas possible de se limiter à la trace laissée par un seul trajet de l'outil. Ceci impose donc de prendre en compte plusieurs trajets consécutifs. Les trajectoires étant localement supposées parallèles, la distance entre deux trajets consécutifs correspond au pas transversal

p .

Ainsi, il est possible de représenter les motifs obtenus pour une approximation locale de la surface par un plan. Ces motifs sont composés d'une juxtaposition de calottes de sphère dont le rayon est le rayon de l'outil utilisé. Des expérimentations (figure 1.3) ont permis de valider ce modèle théorique de calottes de sphère dans le cadre de l'usinage de divers matériaux [Quinsat et al., 2008]. D'autres éléments influents, comme la synchronisation entre passes, le faux rond de l'outil et la tolérance d'usinage, ont été aussi mis en avant [Quinsat, 2004]. Bien que basée sur une géométrie nominale et simplifiée de l'outil, la méthode de simulation proposée a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres de la stratégie d'usinage sur la topographie de surface (figure 1.4). Il a été montré que pour une orientation de l'outil supérieure à un angle limite α_{lim} , le motif obtenu est une juxtaposition de calottes de sphère de rayon égal à celui de l'outil R_o . Les dimensions de l'élément de base du motif sont l'avance à la dent f_z dans le sens longitudinal et le pas transversal p dans le sens orthogonal à l'avance.

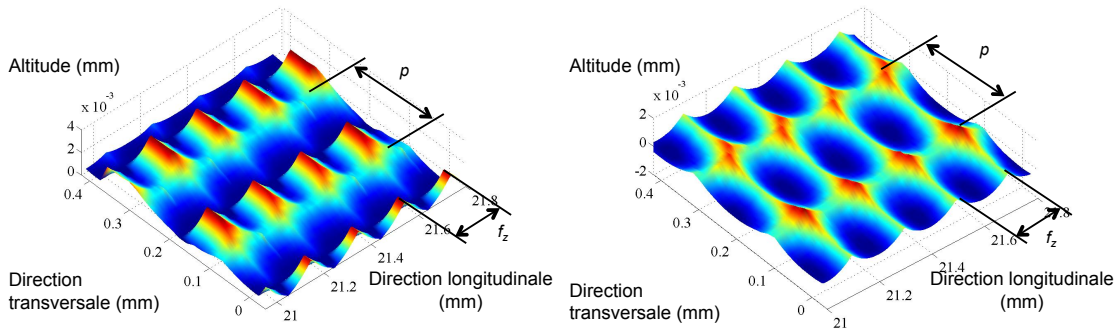


Figure 1.4 – Résultats de simulations ($f_z = 0,2mm$, $p = 0,2mm$) pour une inclinaison nulle à gauche et de 15° à droite [Quinsat, 2004]

2.3 Évolutions de la simulation

Le principe de simulation proposé permet ainsi de lier les paramètres de la stratégie d'usinage avec la topographie de la surface usinée. L'utilisation de ces liens dans le cadre de l'optimisation du procédé de fabrication est décrite à la partie 3. Néanmoins, la modélisation de l'outil reste sous une forme canonique et de géométrie simple (arête circulaire, pas d'angle d'hélice). Les paramètres de la stratégie d'usinage sont supposés égaux à leurs valeurs initiales. Deux points d'amélioration ont été proposés portant

respectivement sur la généricité de la représentation de l'outil et sur le couplage avec des modèles de comportement de machines.

2.3.1 Modélisation de l'outil [Breteau, 2006]

L'un des éléments nécessaires à une prédiction pertinente de la topographie de la surface usinée concerne la modélisation de la géométrie de l'outil. En effet, selon la typologie d'opération réalisée, l'outil peut avoir une géométrie nominale différente (hémisphérique, torique). Plus généralement, un outil peut être représenté (figure 1.5(a)) par sept paramètres [Yau and Tsou, 2015],[Apt 360, 1983]. Néanmoins cette représentation de l'outil, bien que plus complète, n'est pas suffisante. En fonction du matériau usiné, pour une même géométrie globale, l'arête de coupe peut être différente (variation de l'angle d'hélice, acuité). Or, c'est le mouvement enveloppe de l'arête de coupe qui est déterminant pour la réalisation de la topographie et non la géométrie globale. Par exemple, pour une modification de la trajectoire des points de l'arête de coupe due à une variation de l'orientation de l'outil (figure 1.4), la topographie évolue alors que la géométrie de l'outil est identique.

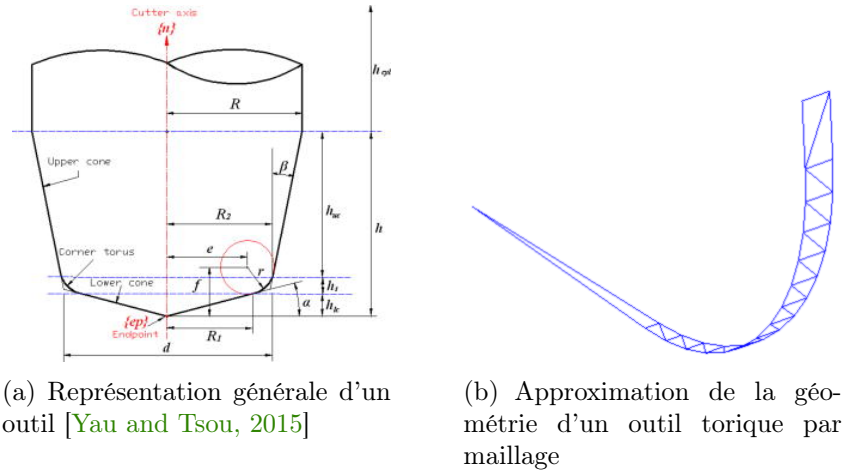


Figure 1.5 – Représentations possibles d'un outil

Il est donc nécessaire de définir une représentation de la géométrie de l'outil pertinente vis-à-vis de la prédiction de la topographie usinée. Ainsi, l'une des originalités des travaux réalisés consiste à utiliser une modélisation de l'outil sous la forme d'un maillage [Breteau, 2006] pour réaliser le calcul de la simulation (figure 1.5(b)). Cette représentation discrète permet, sous forme d'approximation locale de l'outil par des portions de plans, une représentation simple de géométries non canoniques comme celle de l'arête de

coupe. Elle simplifie aussi la simulation, la modélisation de la trace laissée par l'outil devenant une succession de calcul d'intersections entre les mailles du maillage et les droites représentant la discrétisation de la zone étudiée. Néanmoins, la quantité de calcul peut devenir très importante en fonction du maillage utilisé dans la description de l'outil.

2.3.2 Prise en compte du comportement machine [Lavernhe et al., 2010]

La vitesse d'avance est un des paramètres de la stratégie d'usinage pouvant affecter la topographie réalisée comme il a été décrit à la partie 2.2. Il est donc nécessaire de contrôler ce paramètre dans le processus de prédiction de la topographie. Or ce paramètre peut évoluer au cours de l'usinage. En effet, lors de la réalisation de surface complexe en 5 axes continus sur une machine UGV, l'avance réelle est différente de l'avance programmée, en partie à cause des limites cinématiques de la machine, liées à la géométrie de la pièce (courbures, discontinuité en tangence) [Lavernhe et al., 2008]. Il est donc essentiel de pouvoir intégrer un modèle de prédiction de la cinématique de la machine dans la simulation de la topographie usinée.

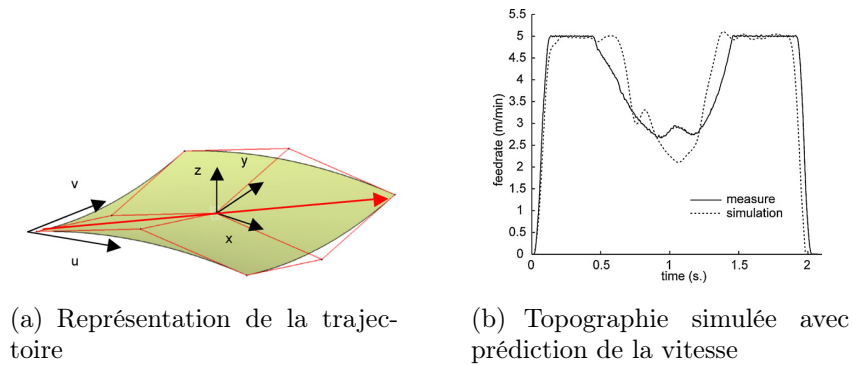


Figure 1.6 – Vitesse d'avance simulée et mesurée le long d'une trajectoire

Dans les travaux réalisés, la topographie 3D obtenue après usinage est simulée en considérant un modèle prédictif de la vitesse d'avance de l'outil. Comme le montre la figure 1.6, la vitesse réelle pour une portion de la trajectoire extraite diminue fortement dans différentes zones. Ces ralentissements sont principalement dus aux limites cinématiques de la machine-outil, et dans certains cas la moitié de la vitesse d'avance programmée peut être atteinte. Le motif simulé pour cette trajectoire est représenté sur la figure 1.7(b). Ce motif est à comparer avec le motif mesuré par un capteur chroma-

tique confocal et représenté sur la figure 1.7(a). Les deux topographies sont relativement proches, et l'amplitude des défauts ainsi que la forme des motifs sont presque identiques. Les principales différences proviennent essentiellement des phénomènes de coupe. Ainsi, les écarts obtenus entre les motifs simulé et mesuré permettent de valider le modèle de prédiction de la topographie de surface usinée avec prise en compte des variations de vitesse.

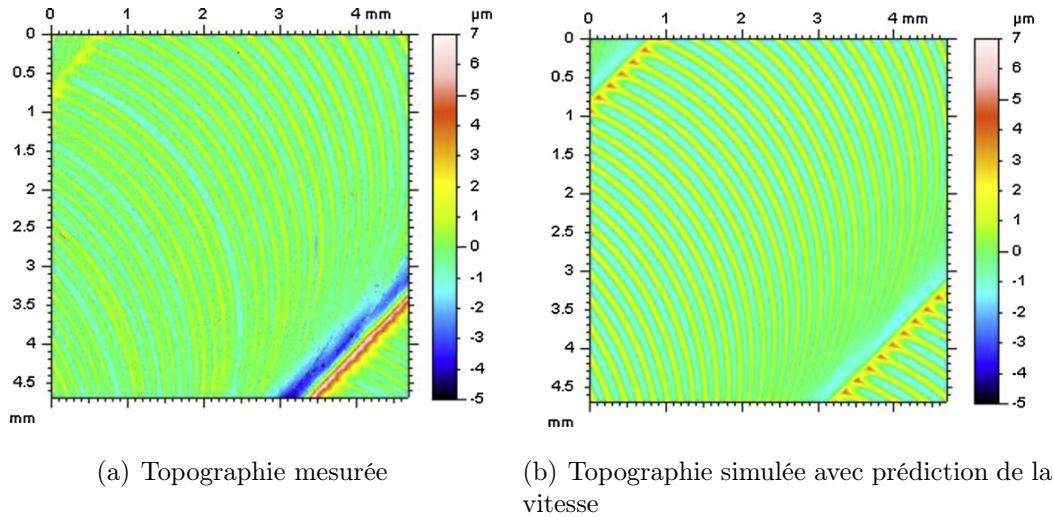


Figure 1.7 – Comparaison des topographies réelles et simulées

Il devient alors possible d'étudier l'impact des performances cinématiques de la machine-outil employée sur la topographie générée. Ceci permet d'obtenir l'évolution des motifs le long de la trajectoire et d'identifier les zones pouvant ne plus satisfaire les critères de qualité requis. La méthode de simulation proposée n'est alors plus seulement dépendante de la stratégie d'usinage employée, mais aussi du moyen employé. Un autre aspect des évolutions de la méthode de simulation concerne la prise en compte de la géométrie réelle de l'outil employé. Ce point est développé au paragraphe suivant.

2.4 Limite géométrique de la simulation [Lavernhe et al., 2014]

La méthode de simulation proposée suppose que l'enlèvement de matière peut être entièrement modélisé par la géométrie de l'arête de coupe et de son mouvement. Les phénomènes de coupe, d'arrachement de matière, de déformations élastiques au contact, de frottement sur la face de dépouille ne sont pas pris en compte. De plus, cette méthode a été validée pour des échelles de défaut de l'ordre du μm et de dimensions caractéris-

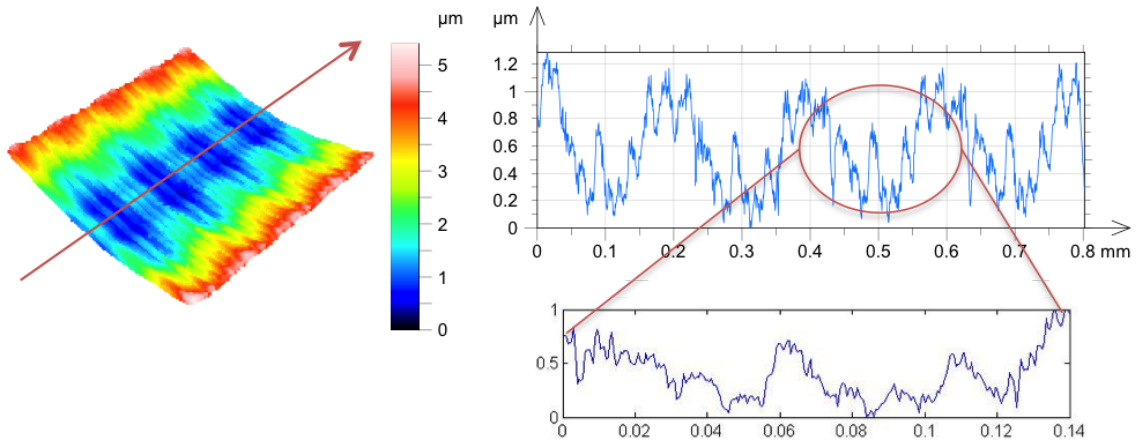


Figure 1.8 – Répétition des motifs

tiques équivalentes à l'avance à la dent et au pas transversal. Or, l'analyse de mesure de surface usinée (figure 1.8) met en évidence la répétition de motifs de longueurs caractéristiques bien inférieures à l'avance à la dent. Cette observation laisse à penser que la transition entre phénomènes géométriques et stochastiques [Denkena et al., 2015] peut être repoussée à un ordre inférieur à l'avance à la dent.

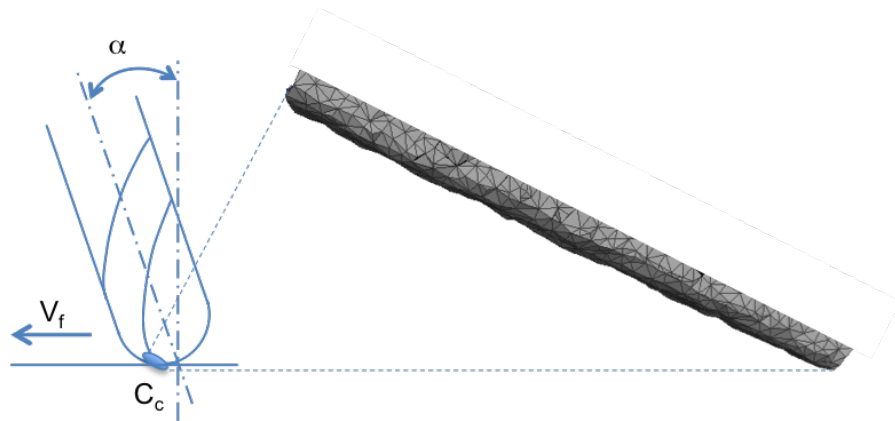


Figure 1.9 – Principe du Calcul

D'autre part, l'utilisation d'une représentation discrétisée de l'outil, sous la forme d'un maillage (figure 1.9), permet d'envisager la prise en compte de la géométrie réelle de l'outil, d'analyser l'influence de la rugosité de l'arête de coupe sur la topographie usinée et de vérifier les limites d'une simulation purement géométrique de l'enlèvement de matière. Ainsi, à partir d'une mesure de l'arête de coupe d'un outil hémisphérique réalisée par un Alicona Infinite Focus (figure 1.10), la topographie de surface peut être simulée. La comparaison entre la simulation et celle obtenue pour une géométrie d'outil

nominale (figure 1.11) montre clairement l'apport de la connaissance sur l'arête de coupe pour la représentation de défauts de dimensions inférieures à l'avance à la dent.

Par conséquent, il semble raisonnable d'envisager la prédiction de la topographie des surfaces usinées à partir de la mesure de l'arête de coupe de l'outil. Cette prédiction permet de modéliser des défauts de dimensions caractéristiques bien inférieures à celles des paramètres de la stratégie d'usinage (avance à la dent, pas transversal). Ceci ouvre la voie de travaux complémentaires. Les premiers concernent la mise en relation de la topographie de surface avec la limite en fatigue de la pièce produite. En effet, la dimension de la géométrie simulable devient cohérente avec les dimensions utilisées dans le cadre des études sur les limites d'endurance. Un deuxième type de travaux concerne plus particulièrement la prise en compte de l'usure de l'arête de coupe et de son impact sur la topographie usinée. En effet, l'élaboration d'un modèle d'usure sous la forme d'un champ de déplacements dépendant du temps à appliquer à chacun des points du maillage, permettrait de réaliser une simulation de début et de fin de réalisation d'un outillage.

3 Étude des relations entre la stratégie d'usinage et la fonction à réaliser

3.1 Apport de l'étude de la topographie de surface sur l'optimisation du processus

La topographie de surface est considérée comme l'élément pivot entre les paramètres de la stratégie d'usinage et la fonction réalisée par la surface. Le fait de disposer d'un

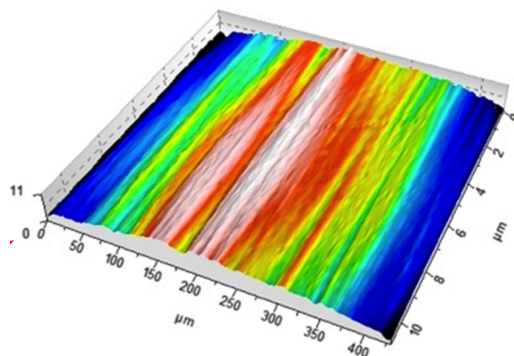


Figure 1.10 – Détail de la surface de l'arête de coupe

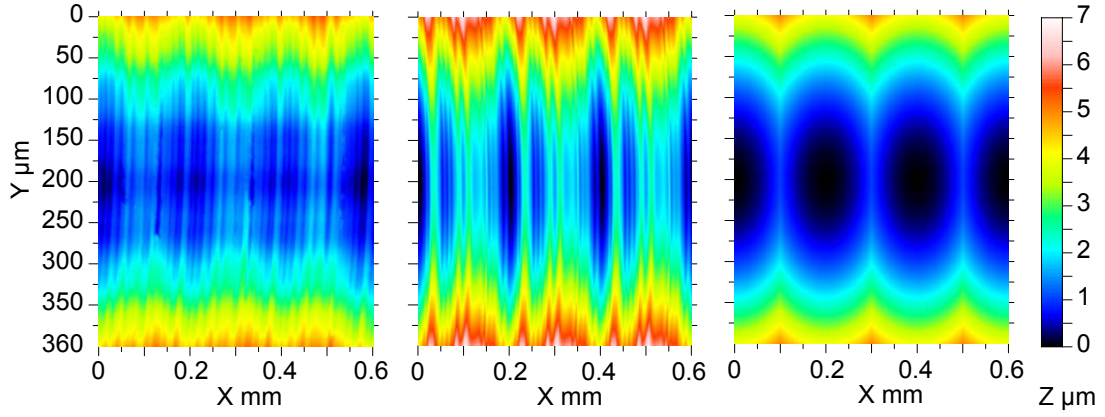


Figure 1.11 – Motifs obtenus : Mesuré - Simulé avec maillage mesuré- Simulé avec maillage nominal [Lavernhe et al., 2014]

outil de simulation et de prédiction de topographie permet ainsi de mettre en place des paramètres de description directement dépendant de la stratégie d'usinage employée. Il a donc été proposé de calculer le paramètre d'amplitude S_z à partir de l'avance à la dent f_z , du pas transversal p_t et du Rayon de l'outil (figure 1.12) [Quinsat et al., 2008].

$$S_z = \frac{f_z^2 + p_t^2}{8.R_o} \quad (1.1)$$

Cette description permet ainsi l'optimisation du procédé de fabrication. Dans le cadre de l'usinage des pièces de formes complexes, il est possible de définir pour un état de surface donné, la direction d'usinage la plus pertinente vis-à-vis du temps d'usinage [Quinsat and Sabourin, 2006], ou encore, pour la définition d'un point de fonctionnement optimal entre usinage et polissage, la quantité de matière à enlever par le polissage peut être

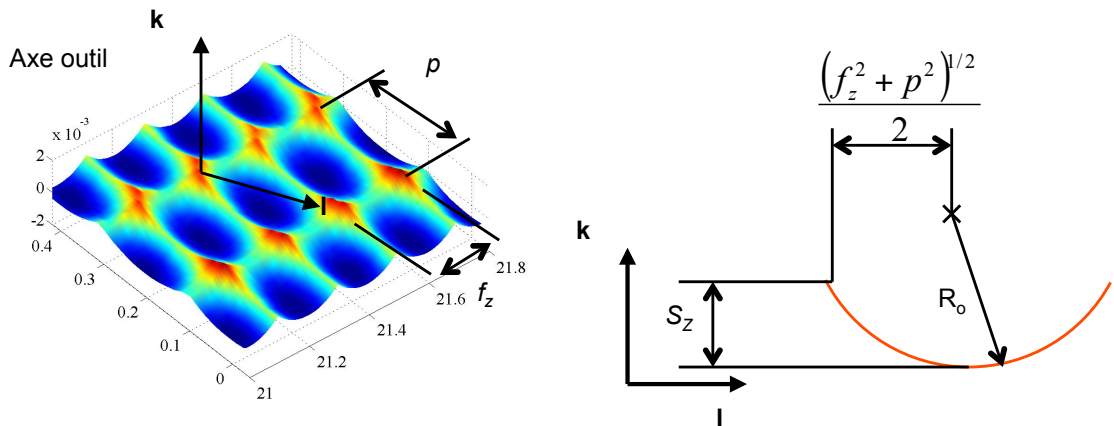


Figure 1.12 – Cacul du paramètre S_z

directement calculée à partir de ce paramètre [Grandguillaume et al., 2015].

3.2 Relation avec les paramètres fonctionnels [Lavernhe et al., 2010, Quinsat et al., 2011]

À partir de ces simulations, il est aussi possible de réaliser des plans d'expériences numériques afin de mettre en évidence l'influence des paramètres de la stratégie d'usinage sur les paramètres d'état de surface. Il est alors possible d'établir un lien entre les éléments de pilotage du procédé et la caractérisation de la topographie. Dans le cadre de l'usinage en 5 axes continu, nous avons donc réalisé, pour un outil torique, le plan d'expérience défini au tableau 1.1. Pour ce plan, quatre facteurs liés à la stratégie d'usinage ont été choisis et pour chacun des essais du plan, la surface usinée a été simulée et un ensemble de paramètres d'état de surface est calculé. Pour chacun des paramètres, il est ainsi possible de calculer l'effet $E_{F_i,j}$ pour un des facteurs F_i au niveau j à partir de la moyenne de ce paramètre pour l'ensemble des essais M et de la moyenne uniquement pour les essais parmi lesquels le facteur F_i est au niveau j (équation 1.2).

$$E_{F_i,j} = (M_{F_i,j} - M) \quad (1.2)$$

Afin de pouvoir comparer l'effet des facteurs pour l'ensemble des paramètres d'état de surface sélectionnés, il a été choisi de normaliser ces effets comme définis à l'équation

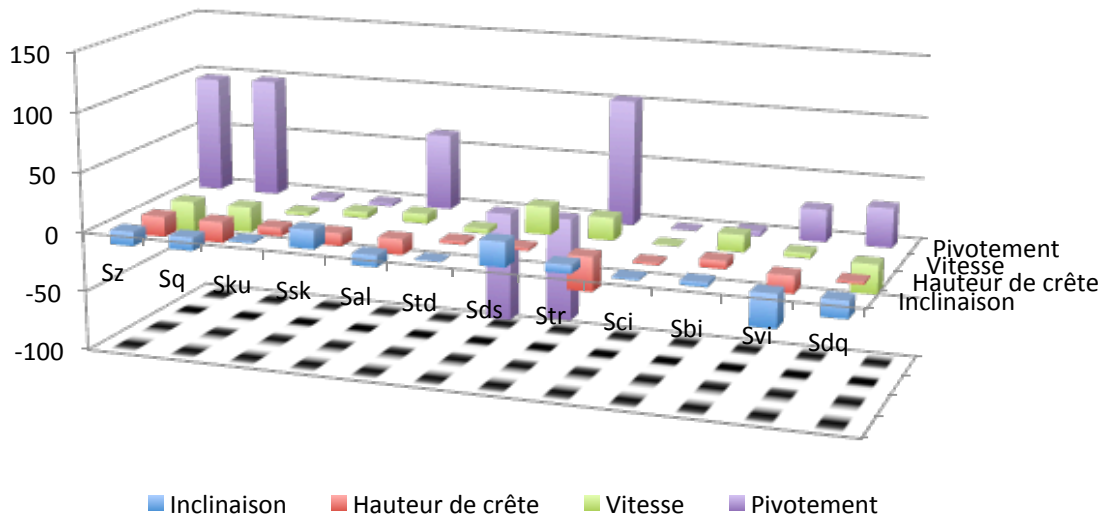


Figure 1.13 – Effet des paramètres de la stratégie d'usinage [Lavernhe et al., 2010]

1.3 :

$$E_{F_i^j} = (M_{F_i^j} - M)/M \quad (1.3)$$

Ainsi que le montre la figure 1.13, l'angle de pivotement (figure 1.14) est le facteur le plus influent sur la topographie de la surface usinée en 5 axes avec un outil torique. La hauteur de crête influence essentiellement les paramètres d'amplitude. La vitesse d'avance peut être considérée comme un paramètre secondaire, agissant principalement sur les paramètres spatiaux et quelques paramètres d'amplitude (S_z, S_q). Certains paramètres d'état de surface comme S_{ku} et S_{ci} sont peu affectés. Il est à noter que l'étude du plan d'expérience ne montre aucune corrélation entre les paramètres de la stratégie d'usinage.

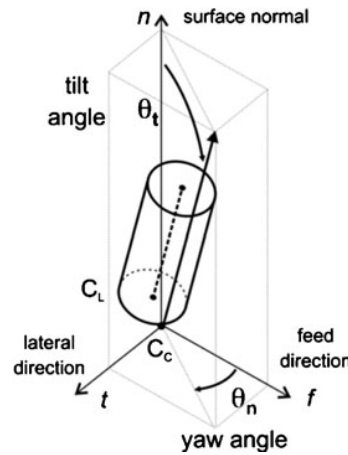


Figure 1.14 – Définition de l'angle de pivotement θ_n et d'inclinaison θ_t

Essai	Pivotement (°)	Inclinaison (°)	Hauteur de crêtes (mm)	Avance (m/min)
1	0	1	0,005	2
2	0	1	0,005	4
3	0	1	0,01	2
4	0	1	0,01	4
5	0	10	0,005	2
6	0	10	0,005	4
7	0	10	0,01	2
8	0	10	0,01	4
9	0	1	0,005	2
10	0	1	0,005	4
11	0	1	0,01	2
12	0	1	0,01	4
13	0	10	0,005	2
14	0	10	0,005	4
15	0	10	0,01	2
16	0	10	0,01	4

Tableau 1.1 – Plan d'expérience réalisé

3.3 Intégrité de surface [Vulliez et al., 2014]

Dans le cadre de la réalisation de pièce mécanique en usinage par enlèvement de matière, de nombreuses études s'attachent à faire le lien entre intégrité de surface et tenue en fatigue. Il est en effet généralement admis que la limite d'endurance des pièces mécaniques est fortement dépendante de l'intégrité de surface c'est-à-dire de l'état de contraintes, de la micro-géométrie 3D de surface et de la microstructure [Novovic et al., 2004]. Lorsque les contraintes résiduelles sont faibles, l'état de surface devient alors le paramètre prédominant. Certains travaux ont en particulier montré que la limite d'endurance, pour les pièces obtenues en fraisage, diminuait lorsque l'état de surface était dégradé vis-à-vis d'un état de référence poli. Certains modèles probabilistes, considérant une loi de distribution des défauts de surface, permettent de corréler ces défauts à la résistance en fatigue [Souto-Lebel et al., 2011]. Ainsi, l'étude de la tenue en fatigue des pièces mécaniques nécessite donc l'analyse de la topographie à des échelles différentes de celle utilisée pour l'étude de l'influence des paramètres de la stratégie d'usinage. Cette recherche de l'échelle d'étude la plus pertinente nous a amené à entamer une collaboration avec le professeur C. Brown de Worcester Polytechnic Institute. Le professeur Brown a développé, au travers de la définition d'un paramètre d'aire relative [Brown et al., 1998], une approche multi-échelles pour l'analyse des topographies de surface permettant de discriminer les paramètres pertinents d'analyse [Scott et al., 2005].

À partir des travaux menés sur la prédiction de la topographie de surface en fraisage 5 axes avec prise en compte de la rugosité de l'arête de coupe (partie 2.4), un couplage complet pourrait être réalisé entre les performances mécaniques de la pièce usinée et les paramètres de la stratégie d'usinage. Or, les travaux menés sur différents échantillons [Vulliez et al., 2014] ont montré que les paramètres standards de description de la topographie usinée (figure 1.15) ne permettent pas de décrire correctement l'influence de la topographie sur la tenue en fatigue, quelle que soit l'échelle d'étude utilisée.

À l'inverse, une étude des courbures k , pour les profils extraits des surfaces mesurées (figure 1.16), montre une bonne corrélation avec l'évolution de cette tenue en fatigue. Cette étude a été menée dans un contexte multi-échelles, c'est-à-dire que le calcul des courbures est réalisé pour différentes échelles d'observation des profils. Ainsi, à partir d'une évaluation (tableau 1.2) de l'évolution des courbures (moyenne \bar{k} et écart type σ_k) pour l'ensemble des profils extraits pour chaque échantillon, il est possible de déterminer

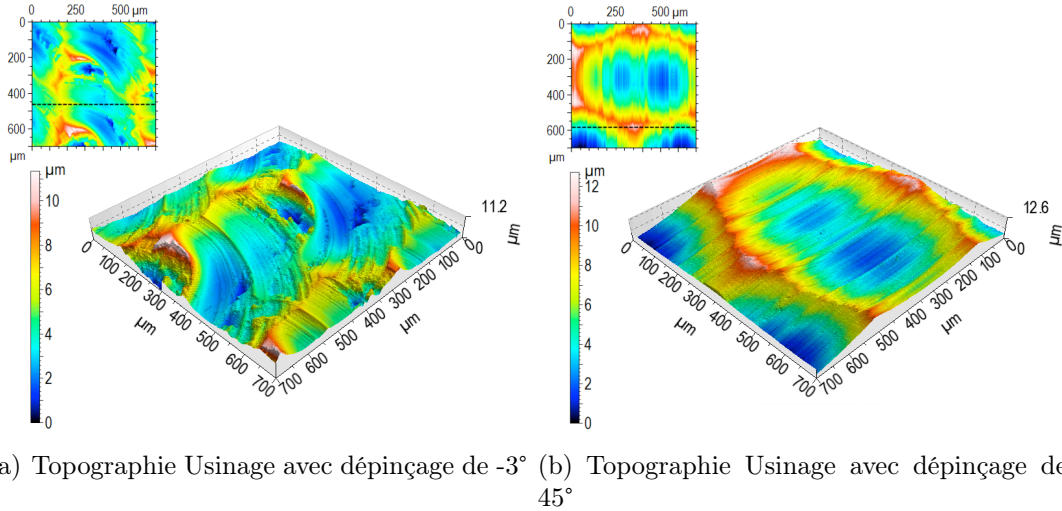


Figure 1.15 – Comparaison des topographies pour des orientations d'outil différentes

l'échelle la plus représentative permettant de lier la courbure à la tenue en fatigue. Il apparait ainsi que le tracé de l'évolution de la tenue en fatigue en fonction d'un critère de type $\max(\bar{k} + 2.\sigma_k)$, permet une très bonne régression linéaire à une échelle de $610 \mu m$. Cette échelle est de l'ordre de grandeur de l'avance à la dent choisie pour les essais, ce qui laisse supposer que les défauts liés à la cinématique du procédé seraient plus déterminants sur la tenue en fatigue, que les défauts d'un ordre inférieur. Néanmoins, ces conclusions sont à nuancer compte tenu du faible nombre d'échantillons étudiés et de la non-prise en compte des aspects liés aux contraintes résiduelles.

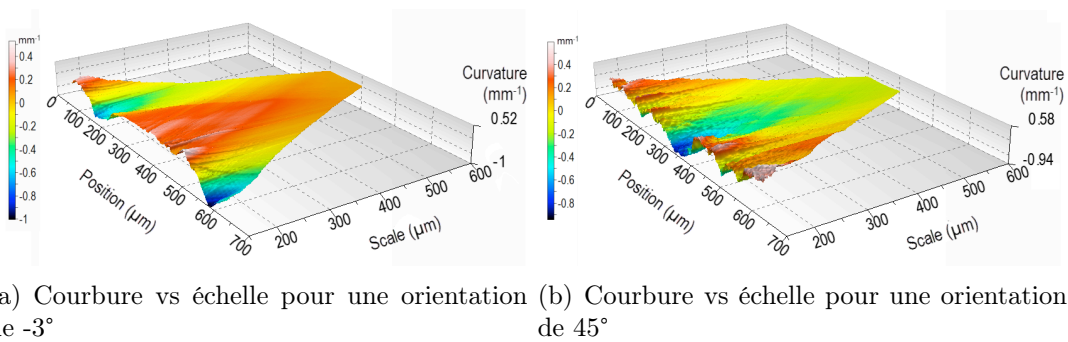


Figure 1.16 – Représentation de la courbure à différentes échelles pour les profils extraits figure 1.15

Les travaux présentés montrent l'intérêt de l'étude de la topographie de surface comme élément pivot entre les paramètres de la stratégie d'usinage et la fonctionnalité de la surface réalisée. Ces études sont focalisées sur le procédé d'usinage par enlèvement

Méthode	max R^2	échelle (μm)
$max(k)$	0,76	620
$10.max(k)$	0,8	618
$max(\bar{k} + \sigma_k)$	0,65	620
$max(\bar{k} + 2.\sigma_k)$	0,96	610

Tableau 1.2 – Relation entre la courbure et la fatigue

de matière et plus particulièrement sur la réalisation des pièces de formes complexes. Dans une prochaine partie, la possibilité de l’extension de ces travaux au procédé de polissage est détaillée.

4 Maîtrise de la qualité des surfaces en polissage [Guio, 2012, Quinsat et al., 2015]

Les recherches réalisées sur le polissage, concerne l’automatisation de ce procédé sur des centres d’usinage grande vitesse 5 axes. Même si le développement de l’UGV a modifié profondément la production des moules et matrices en réduisant fortement les temps d’usinage, les états de surface obtenus nécessitent le plus souvent une opération de polissage. Celle-ci est la plupart du temps réalisée manuellement ce qui augmente le temps de production, ainsi que le cout de l’outillage réalisé. Aussi, différents travaux ont été menés pour l’automatiser. Les travaux présentés portent tout particulièrement sur l’automatisation du procédé de polissage sur une machine-outil 5 axes [Pessoles and Tournier, 2009], l’avantage principal étant de pouvoir réaliser l’opération de polissage sur le centre d’usinage ayant servi à l’ébauche. Les outils utilisés sont identiques à ceux utilisés en polissage manuel (figure 1.17). Ils sont composés d’une tige métallique autour de laquelle une partie déformable en élastomère est fixée. La pastille abrasive est elle même montée sur la partie en élastomère. La pression de polissage et la vitesse sont contrôlées respectivement par la longueur de l’outil utilisé dans le directeur de commande numérique et la rotation de la broche.

L’extension des travaux réalisés sur le procédé d’usinage par enlèvement de matière ne peut être directement transposée au procédé de polissage. La principale difficulté provient d’une gestion de l’usure de l’outil, devenant prédominante compte tenu de la variation d’efficacité de l’abrasif utilisé, et d’une modélisation de l’enlèvement de matière géométriquement plus complexe. Par rapport aux études présentées précédemment (par-

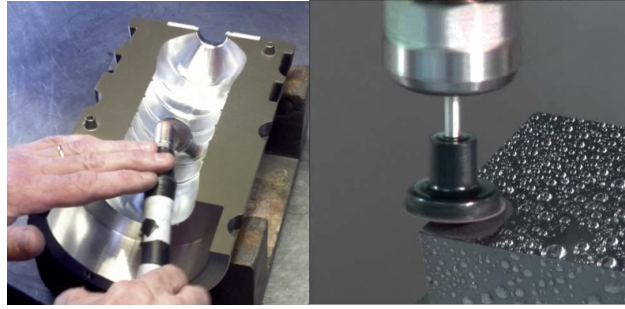


Figure 1.17 – Comparaison entre polissage manuel et automatisé

tie 2.2 et 3), le procédé de polissage diverge du procédé d'usinage selon trois principaux aspects :

- La modélisation de l'enlèvement de matière est géométriquement plus complexe : la répartition et la forme des grains d'abrasif sont aléatoires et le processus d'enlèvement de matière de chacun des grains est dépendant de sa géométrie.
- La géométrie du contact entre le disque souple et la pièce est liée à la stratégie de polissage employée et à la géométrie de la pièce [Guiot, 2012]. Elle dépend directement de l'écrasement et de l'inclinaison programmés et des courbures locales. La forme de l'outil à simuler dépend donc directement des paramètres de la stratégie.
- La gestion de l'usure de l'outil devient prédominante compte tenu de la variation d'efficacité de l'abrasif utilisé et donc de l'enlèvement de matière. En effet, cette efficacité ne peut être considérée comme constante au cours de l'opération de polissage.

Les travaux entrepris se sont jusqu'à présent concentrés sur la variation d'efficacité. Après avoir rappelé les principaux modèles d'abrasion, une méthodologie d'identification de la variation d'efficacité est proposée. Enfin, une stratégie de polissage à taux d'enlèvement de matière est présentée dans une dernière partie.

4.1 Principe

La mesure ou la quantification de l'abrasion est souvent définie par le taux d'enlèvement de matière (Material Removal Rate - MRR) qui permet de relier l'épaisseur de matière enlevée par unité de temps. Ce taux peut être défini de manière expérimentale, il est dépendant de la vitesse relative entre l'abrasif et la pièce à polir. Classiquement cette dépendance est caractérisée par la loi de Preston [Preston, 1927] (équ. 1.4), où K

est appelé coefficient de Preston, P et V représentant respectivement la pression et la vitesse.

$$MRR = \frac{dh}{dt} = K \cdot P \cdot V \quad (1.4)$$

Une autre modélisation plus générale du MRR peut être utilisée (équ. 1.5) permettant de mettre en avant une plus grande dépendance de ce taux à la pression de contact [Klocke et al., 2011]. Ainsi, trois constantes peuvent être introduites (K, α, β) pour lier le taux d'enlèvement de matière à la pression et la vitesse. Ces constantes doivent être déterminées expérimentalement.

$$MRR = K \cdot P^\alpha \cdot V^\beta \quad (1.5)$$

Indépendamment du modèle utilisé pour représenter le taux d'enlèvement de matière, il y a toujours un paramètre K représentant l'efficacité de l'abrasif utilisé. Cette efficacité dépend du type d'abrasif utilisé, mais aussi de son usure. Elle évolue ainsi en fonction du temps d'utilisation de cet abrasif. Pour illustrer cette évolution, il suffit d'étudier une opération de pré-polissage avec un papier de type P600 pour une surface plane de $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. Le matériau utilisé est un acier de dureté 52 HRC (X38CrMoV5-1). Une vitesse d'avance de 2 m/min est choisie et l'écrasement de l'outil ainsi que son dépinçage (angle d'inclinaison θ_t à la figure 1.14) sont respectivement de 0.5 mm et 15° . La vitesse de broche est quant à elle fixée à 2000 tr/min . La surface polie est ensuite mesurée à l'aide d'un capteur chromatique confocal (Fig. 1.18(b)). Dans cet exemple, la profondeur d'abrasion décroît de $2,7 \mu\text{m}$ à $1,5 \mu\text{m}$ entre le début et la fin de l'opération. La baisse d'efficacité est plus importante au début de l'opération avec une baisse de 50% lors des trois premières minutes. Sur la fin de l'opération, l'évolution est beaucoup plus faible. Cette variation importante de topographie au cours de l'opération de polissage décrite explique pourquoi les travaux réalisés se sont dans un premier temps orientés en priorité sur l'identification de l'usure de l'abrasif.

Ainsi, il a été choisi d'exprimer l'évolution de la profondeur de matière enlevée au cours du temps $dh(t)$ à partir d'une profondeur initiale dh_i et d'une efficacité de l'abrasif en fonction du temps $\gamma(t)$ (équation équations 1.6). Cette efficacité dépend d'une constante de temps τ et d'une efficacité finale γ_f (équation 1.7). Ces trois constantes (dh_i, γ_f, τ) sont à déterminer par une minimisation au sens des moindres carrés à partir de données expérimentales [Quinsat et al., 2015]. Des études complémentaires [Guiot,

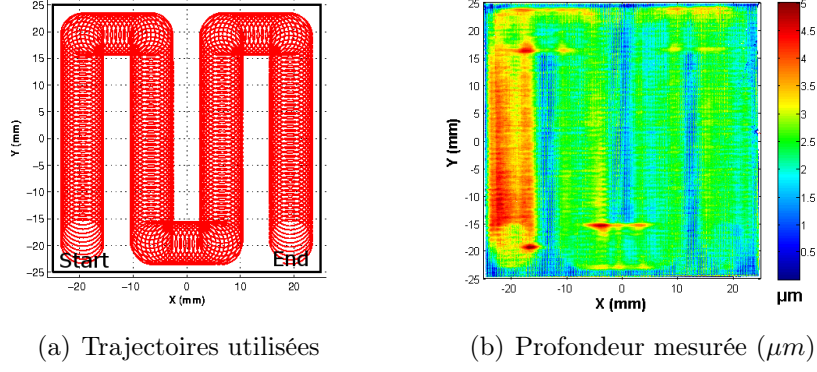


Figure 1.18 – Variation de l'efficacité le long de la trajectoire

2012] ont montré que l'une des principales limites de cette approche concerne la non-prise en compte des aspects thermiques liés aux cycles de déformation successifs du porte-outil (dus à l'écrasement et à la rotation de la broche), ainsi que le procédé de polissage lui-même.

$$dh(t) = dh_f + (dh_i - dh_f) * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (1.6)$$

$$dh(t) = dh_i \cdot \gamma(t) = dh_i \cdot \left(\gamma_f + (1 - \gamma_f) * e^{\frac{-t}{\tau}} \right) \quad (1.7)$$

4.2 Stratégie de polissage à taux d'enlèvement de matière constant

À partir de cette identification du pouvoir abrasif, nous montrons maintenant les possibilités, de maîtriser la qualité de la surface générée par le procédé de polissages, offertes par la mise au point de stratégie de polissage à taux d'enlèvement de matière constant. Comme montré précédemment, la variation d'efficacité au cours du temps d'un disque abrasif peut être modélisé par une fonction décroissante $\gamma(t)$. Comme le taux d'enlèvement de matière MRR est défini par $MRR = dh/dt$, alors le coefficient de Preston K (Eq. 1.4) peut être supposé proportionnel à l'efficacité, c'est-à-dire que $K(t) = K_0\gamma(t)$. Le taux d'enlèvement de matière peut ainsi être défini par l'équation 1.9.

$$MRR(t) = K_0 \cdot P \cdot V \cdot \left(\gamma_f + (1 - \gamma_f) * e^{\frac{-t}{\tau}} \right) \quad (1.8)$$

$$MRR(t) = MRR_0 \cdot \left(\gamma_f + (1 - \gamma_f) * e^{\frac{-t}{\tau}} \right) \quad (1.9)$$

Donc, d'après le modèle proposé à l'équation 1.9, la quantité de matière enlevée est proportionnelle à la fréquence de rotation de la broche et inversement proportionnelle à la vitesse d'avance. L'idée est donc d'utiliser ces deux paramètres pour compenser l'évolution de l'efficacité de l'abrasif $\gamma(t)$ et de maintenir l'écrasement et l'orientation de l'outil constants. Ainsi, trois méthodes sont possibles pour compenser la variation d'efficacité le long de la trajectoire :

- compensation par diminution de la vitesse d'avance afin d'augmenter le temps local d'abrasion,
- compensation par augmentation de la fréquence de rotation de la broche afin d'augmenter la vitesse d'abrasion,
- compensation mixte en modulant à la fois la vitesse d'avance et la fréquence de broche.

Dans le cadre d'une compensation par diminution de la vitesse d'avance, pour une distribution de pression et une vitesse d'abrasion supposées constantes, le taux d'enlèvement de matière suit la loi définie à l'équation 1.9, MRR_0 étant une constante. Ainsi, une variation de profondeur Δh correspond à un déplacement élémentaire Δl_0 durant un temps Δt , peut être calculée de la façon suivante :

$$\Delta h(t) = MRR(t) \cdot \Delta t = (MRR_0 \cdot \gamma(t)) \cdot \left(\frac{\Delta l}{V_f(t)} \right) \quad (1.10)$$

Pour obtenir un enlèvement de matière constant Δz_0 , dans le cadre d'une pression et d'une vitesse d'abrasion constantes, la vitesse d'avance doit donc être proportionnelle à l'évolution de l'efficacité.

$$V_f(t) = \left(\frac{MRR_0 \cdot \Delta l_0}{\Delta z_0} \right) \cdot \gamma(t) = V_{f0} \cdot \gamma(t) \quad (1.11)$$

Avec cette méthode, la vitesse d'avance est maximale au début puis décroît pour compenser la variation d'efficacité. Il est donc nécessaire de choisir une vitesse d'avance initiale V_{f0} de façon à éviter un enlèvement de matière excessif au début de l'opération, mais compatible aussi avec les performances cinématiques de la machine-outil utilisée.

En reprenant les mêmes conditions expérimentales que celles utilisées dans l'exemple de la partie 4.1. Il est possible de choisir une vitesse V_{f0} de 2,6 *m/min* compatible avec la trajectoire trochoïdale et la machine employée comme le montrent les profils de vitesse programmée et mesurée représentés à la figure 1.19(a) en fonction de l'abscisse curviligne.

La figure 4.8 montre l'évolution de la profondeur sur la surface polie et démontre ainsi l'effet de la compensation en vitesse qui permet d'obtenir un enlèvement de matière quasiment constant le long de la trajectoire. Néanmoins, la diminution contrôlée de la vitesse d'avance, bien que permettant un contrôle du taux d'enlèvement de matière, augmente nécessairement le temps de l'opération.

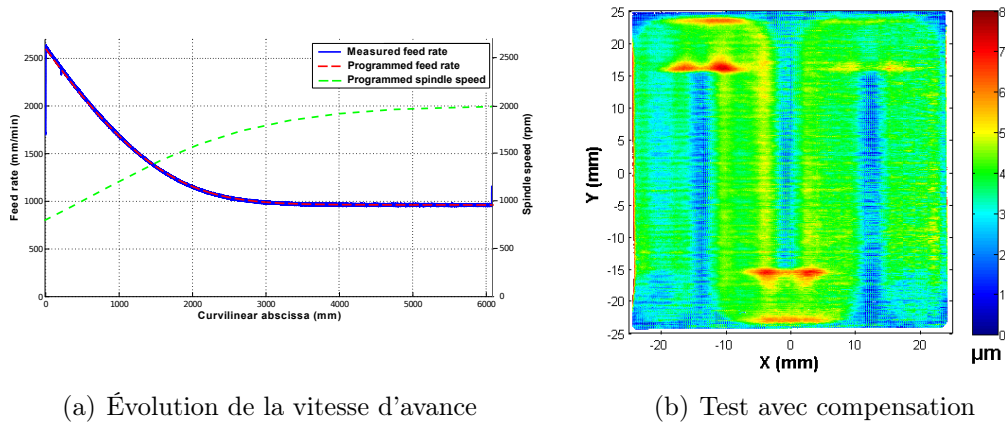


Figure 1.19 – Prise en compte de l'usure de l'abrasif [Quinsat et al., 2015]

Une autre méthode de compensation pourrait être réalisée par une augmentation de la fréquence de rotation de la broche. Celle-ci est plus efficace en termes de temps d'usinage, car elle ne nécessite pas de diminuer la vitesse d'avance. Néanmoins, le modèle de variation d'efficacité n'est déterminé que pour une vitesse d'abrasion constante ce qui rend plus hypothétique la maîtrise du taux d'enlèvement. D'autre part, usuellement la gestion des axes de déplacements par les directeurs de commande numérique des MOCN impose que la vitesse de rotation de la broche soit constante entre deux points programmés. Cette contrainte nécessite donc une adaptation des commandes numériques [Guiot, 2012].

Une dernière méthode de compensation serait d'utiliser une variation de la vitesse de broche puis une variation de vitesse d'avance. Cette compensation mixte permettrait :

- une plage de variation de fréquences de rotation de la broche réduite et ainsi une prédiction de la variation d'efficacité plus robuste,
- une vitesse d'avance finale plus élevée et ainsi un temps de polissage moins long.

Cette problématique de maîtrise de la qualité des surfaces en polissage automatisé est à l'origine de mes travaux sur la mesure *in-situ*. En effet, les incertitudes de repositionnement de la pièce dans l'espace de travail de la machine sont très pénalisantes pour

le contrôle des paramètres opératoires (écrasement) et le respect des défauts de forme souhaités. Or lors d'une gamme complète de polissage, c'est-à-dire plusieurs opérations de polissage successives avec des grains de plus en plus fins, le démontage de la pièce pour une mesure hors machine de l'état de surface atteint après une des opérations perturbe complètement l'opération suivante. Il devient alors nécessaire de réaliser cette mesure au sein de la machine-outil sans démontage de la pièce. Ce problème m'a conduit à l'intégration d'un capteur chromatique confocal (paragraphe 3.1 du chapitre 2) et à réfléchir sur le contexte de mesure *in-situ*.

5 Conclusion

Ce chapitre s'attache à présenter les travaux réalisés sur l'amélioration de la prédiction de la topographie des surfaces manufacturées. L'objectif est d'obtenir une représentation cohérente de cette topographie, afin de maîtriser la qualité des surfaces produites, et d'établir les liens entre les paramètres du procédé et la fonction attendue de la surface.

Pour ceci, ces travaux ont abouti à une méthodologie de simulation de la topographie incluant un modèle de comportement de la machine ainsi que la rugosité de l'arête de coupe. Les prédictions obtenues permettent alors d'étudier la topographie à une échelle inférieure à l'avance à la dent. Connaissant la géométrie et la répartition des zones de contact entre l'arête de coupe et la pièce, il est alors envisageable, pour poursuivre ces travaux, d'introduire des modèles d'usure et d'efforts de coupe, de façon à améliorer la topographie prédite.

Des relations entre la fonction de la surface générée et les paramètres du procédé ont ensuite été établies. Dans un premier cas, l'étude s'est portée sur la détermination de l'influence des paramètres d'usinage en fraisage 5 axes continus sur les paramètres d'état de surface fonctionnels. Cette étude s'appuie sur la réalisation d'un plan d'expérience numérique, rendu possible par l'outil de simulation. Dans un deuxième cas, une analyse multi-échelles a mis en évidence la pertinence d'une étude de la topographie de surface à l'échelle de l'avance à la dent, pour analyser la tenue en fatigue des pièces produites.

Enfin, lors des travaux de thèse de A. Guiot [Guiot, 2012], une analyse de la surface réalisée, lors d'opération de pré-polissage automatique sur MOCN 5 axes, a pu mettre en avant les phénomènes d'usure de l'abrasif et leurs prédictions. Il est ainsi possible de proposer des stratégies de pré-polissage maîtrisant le défaut de forme généré. Néanmoins

pour ce procédé, une modélisation plus fine à l'échelle de l'abrasif devrait être envisagée pour décrire plus correctement l'état de surface produit.

Chapitre 2

Mesure in-situ

Ce chapitre porte sur la description des problématiques abordées dans le cadre de la mesure *in-situ*. Après avoir explicité ce contexte particulier et présenté le positionnement des travaux dans le cadre de la mesure sans contact, une modélisation des échanges de données pour la mesure *in-situ* est proposée. Une deuxième partie est consacrée à l'intégration et à la qualification de différents capteurs dans un système de production et ce dans l'objectif de réaliser de la mesure multi-capteurs/multi-échelles. Enfin, dans une dernière partie un outil de détection de défauts, basé sur un système de corrélation d'images, est présenté.

Sommaire

1	Introduction	69
2	Gestion des gammes de fabrication et de Mesure	72
2.1	Description des données	73
2.2	Description des activités	75
2.3	Sélection de capteurs	76
2.3.1	Méthodologie de sélection [Mehdi-Souzani et al., 2016]	78
2.3.2	Association capteur/échelle de défaut [Dubreuil et al., 2014]	80
3	Intégration et qualification des capteurs pour la mesure <i>in-situ</i>	81
3.1	Mesure par capteur chromatique confocal [Quinsat and Tournier, 2012]	81
3.2	Mesure par capteur laser plan	84
3.3	Mesure par système de Vision [Dubreuil, 2016]	86
3.3.1	Calibration <i>in-situ</i> pour système de vision [Dubreuil et al., 2015]	86
3.3.2	Apport de la vision comme outil de détection de défaut	93
4	Conclusion	100

1 Introduction

La surveillance des procédés de fabrication est un enjeu important pour le contrôle des coûts de production et la qualité des pièces fabriquées. La plupart du temps, une mesure à 100% des premières pièces produites est même nécessaire lors de la phase de la stabilisation du processus. De plus en plus, les procédures d'inspection sont intégrées au processus de fabrication. Cela permet en effet des gains significatifs, comme la rapidité d'inspection, la flexibilité de mesure, l'inspection en cours de processus ou encore la possibilité d'une inspection à 100% [Chen and Su, 1996]. Il est alors possible de différencier la mesure dite *in-situ*, de la mesure *in-process* ou encore de la mesure *on-machine* [Vacharanukul and Mekid, 2005].

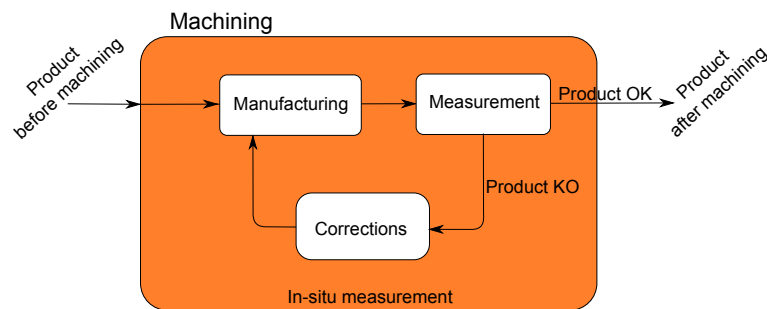


Figure 2.1 – Contexte de la mesure *in-situ* [Dubreuil et al., 2015]

La mesure *in-situ* regroupe l'ensemble des techniques permettant la réalisation de la mesure de la pièce dans l'enceinte de la machine sans impliquer son démontage. La mesure *in-situ* permet donc une prise de décision rapide, relativement à la conformité géométrique et dimensionnelle de la pièce réalisée, la mesure étant alors réalisée dans la même phase que la phase de fabrication. Lors d'une mesure *in-process*, le procédé de fabrication n'est pas stoppé. La mesure s'effectue alors de manière simultanée avec la réalisation de la pièce. Il s'agit le plus souvent de surveillance d'usinage, et la mesure effectuée n'est pas nécessairement la géométrie de la pièce, mais une caractéristique autre, telle qu'un effort de coupe, les vibrations de la broche, etc. Le terme mesure *on-machine* est plus particulièrement dédié aux opérations de mesure pour lesquelles la machine-outil est le système (ou porteur) permettant les déplacements du capteur. L'opération de mesure nécessite alors l'arrêt des opérations d'usinage. Dans tous les cas, ces techniques de mesure permettent d'envisager la mise en place d'actions correctives, soit directement sur la pièce mesurée, si le défaut le permet, soit sur la pièce suivante.

Les techniques de mesure associées peuvent être classées en six catégories [Vacharanukul and Mekid, 2005, Shiraishi, 1989, Yandayan and Burdekin, 1997] : mécanique, optique, pneumatique, ultrasonique, électrique et thermique. Les méthodes optiques sont celles qui permettent un bon compromis entre la vitesse d'acquisition et la résolution de la mesure. Il est ainsi possible de maîtriser les défauts d'état de surface en tournage [Shahabi and Ratnam, 2016], comme les déformations de pièces et les variations géométriques du brut en fraisage [Poulhaon et al., 2014]. Dans le domaine de la fabrication additive, les mesures *in-process* sont réalisées par des systèmes à base de caméras et permettent la vérification des formes internes et le contrôle des discontinuités dans la structure du matériau [Everton et al., 2016]. Pour le contexte particulier de la mesure *on-machine*, les systèmes à contact comme les palpeurs sont peut-être les plus utilisés. Ils sont très largement représentés dans la littérature et permettent finalement d'envisager l'utilisation d'une machine-outil en lieu et place d'une machine à mesurer tridimensionnelle [Mears et al., 2009].

De plus, les défauts inhérents à l'usinage de pièces de formes complexes comme les hauteurs de crêtes, les facettisations, les défauts de raccords entre les différentes stratégies ou posages présentent des échelles et des étendues différentes [Dubreuil et al., 2014]. Ainsi, la mesure des surfaces complexes nécessite très souvent différents capteurs, utilisés de manière complémentaire [Weckenmann et al., 2009]. Dans la littérature, différents systèmes de mesure sont comparés ou classifiés, Schwenke et al. [Schwenke et al., 2002] présentent un état de l'art des différentes techniques de mesure possibles et leurs applications. Après avoir présenté différents cas d'étude en fonction de la forme, des dimensions, Savio [Savio et al., 2007] proposent une inter-comparaison de différents capteurs. Il s'agit principalement d'un palpeur à contact et d'un capteur optique montés sur une MMT, de projection de franges, d'un laser tracker. La tomographie, ainsi que la photogrammétrie et la microscopie confocale constituent également des capteurs étudiés. Il est donc nécessaire de prévoir un protocole de sélection de capteurs lors de la réalisation de la gamme de mesure, afin de choisir le plus pertinent en termes de temps de mesure.

Indépendamment des capteurs choisis, la réduction du temps de mesure et des incertitudes de mesure passe par une amélioration et une adaptation des gammes de contrôle afin de prendre en compte les spécificités de la mesure *in-situ*. À titre d'exemple, il est possible de citer les travaux de Cho et Seo. [Cho and Seo, 2002] qui proposent une

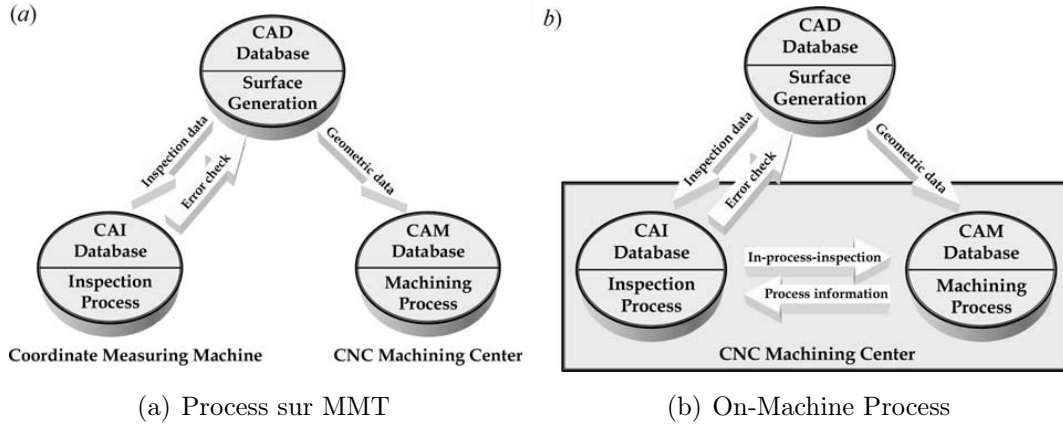


Figure 2.2 – Différents process de contrôle [Cho and Seo, 2002]

stratégie de palpage *on-machine* pour les pièces de formes complexes. La trajectoire de l'outil usinant la surface est utilisée afin de ne pas palper de points sur les lignes de crêtes et ainsi d'éviter de perturber la mesure. La mesure *in-situ* assure ainsi un lien direct (figure 2.2) entre les processus de génération de gamme de contrôle (CAI) et de gamme d'usinage (CAM) permettant d'aller vers un processus de fabrication totalement intégré [Chen and Su, 1996]. Lee et al. [Lee et al., 2004] et Cho et al. [Cho et al., 2004] proposent une approche basée sur des entités permettant de lier les processus d'usinage et de contrôle. Une première étape dite globale regroupe et ordonne les entités pour la phase de mesure, une deuxième dite locale définit les trajectoires de palpage pour chacune des entités. Plus récemment, Zhao [Zhao et al., 2008, Zhao and Xu, 2010] élaborent un modèle de données pour la mesure *on-machine* par palpeur à contact sous un format Step-NC (figure 2.3).

L'inconvénient principal de l'intégration de la mesure au sein du processus de fabrication concerne les problèmes logistiques introduits dans le flux des pièces produites, notamment à cause de la perte de disponibilité de la machine lors de l'inspection de la pièce. Par conséquent, le processus de planification du contrôle est essentiel pour la réussite de l'intégration de la mesure *in-situ*. L'élément le plus important concerne l'analyse du compromis entre le temps de mesure et la précision c'est-à-dire l'efficacité du contrôle proposé. Il est aussi nécessaire, dans l'évaluation de cette efficacité, de prendre en compte le temps requis à la mise en place d'actions correctives si nécessaire.

Dans ce contexte, les travaux réalisés et présentés dans ce chapitre sont centrés sur l'apport et l'intégration des capteurs sans contact pour la mesure *in-situ*. Ces travaux

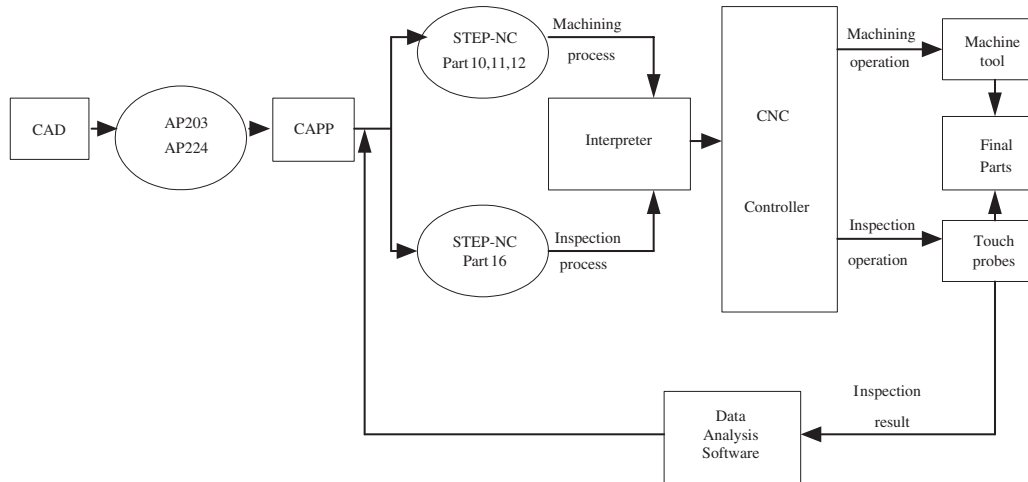


Figure 2.3 – Modèle de données proposé par [Zhao et al., 2008]

ont été en partie réalisés dans le cadre des thèses de L. Dubreuil et M. D. Phan. Une des originalités des travaux concerne le regard porté sur ce problème de mesure au travers d'un prisme multi-capteurs. Les défauts géométriques étant de différentes échelles, il devient alors nécessaire de réfléchir sur la sélection et la collaboration de différents capteurs. Un autre aspect original des travaux est lié à l'intégration de ces capteurs dans un environnement particulier, celui d'un centre d'usinage. Ceci demande, en plus de qualifier les capteurs dans cet environnement, d'améliorer l'efficacité de la mesure.

Dans une première partie, les problématiques de planification des opérations d'usinage et de mesure sont détaillées ainsi que les travaux concernant la sélection des capteurs. Une deuxième partie de ce chapitre est consacré à l'intégration et à la qualification de capteurs dans un contexte *in-situ*. Enfin dans une dernière partie, un outil de détection de défauts est présenté, cet outil ayant pour objectif de limiter le temps alloué à la mesure.

2 Gestion des gammes de fabrication et de Mesure

Afin de faciliter la planification des processus de mesure *in-situ* et d'utiliser les données de manière plus efficace, nous proposons dans cette partie une modélisation permettant de prendre en compte les diverses représentations et états de la pièce à réaliser. Cette modélisation inclut également les informations de définition, de planification des processus d'usinage, des machines-outils et des capteurs. Ces travaux sur la modélisation des gammes de fabrication et de mesure font l'objet des travaux de thèse de L. Dubreuil.

2.1 Description des données

Parmi les nombreux standards de langage de modélisation existant afin de représenter les systèmes, leurs comportements ainsi que les échanges entre les différents composants, nous avons choisi le langage sysML. Ce langage de modélisation récent a été mis en place pour uniformiser la modélisation système [Roques, 2013]. Le principal avantage est de permettre de décrire un système complet avec une seule modélisation homogène. Notre système étudié est le processus complet de fabrication et de mesure. L'objectif est de représenter l'ensemble des éléments présents ainsi que la circulation des données pour la réalisation de mesure *in-situ*.

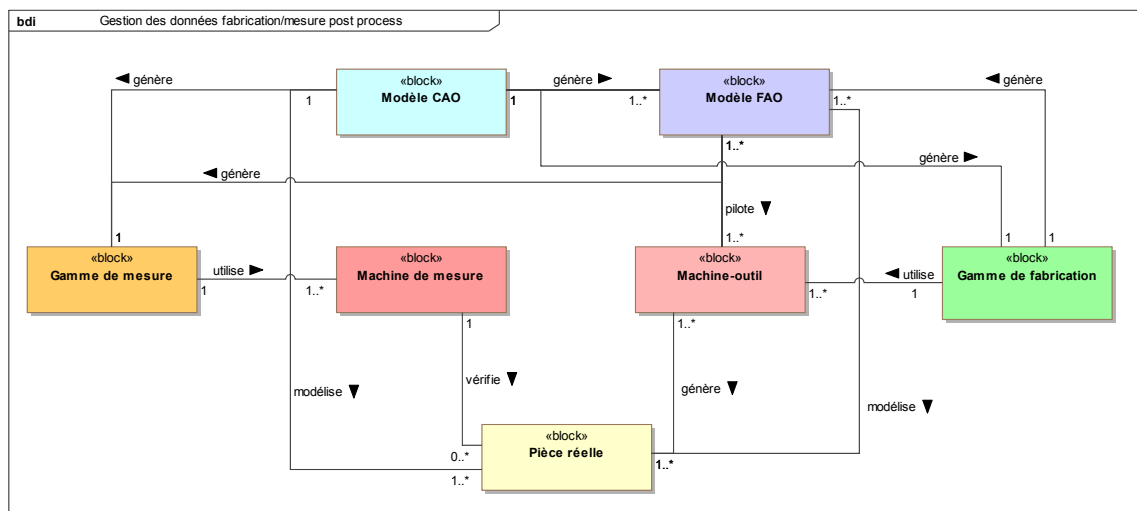


Figure 2.4 – Diagramme de définition de blocs pour une mesure en dehors de la machine-outil

Pour une mesure en dehors de la machine sept *block* sont identifiés (figure 2.4) : le modèle CAO, le Modèle FAO, la Gamme de fabrication, la Gamme de mesure, la Pièce réelle, la Machine outil et la Machine de mesure. Le modèle CAO est le maillon de départ de la fabrication. En effet, il est issu du bureau d'études et modélise la pièce dans son état nominal en réponse à des exigences fonctionnelles. Celui-ci comporte des entités CAO ainsi que des spécifications géométriques et dimensionnelles (GD&T) associées aux surfaces fonctionnelles.

Le modèle FAO est un composant modélisant les différents états de la pièce au cours du processus de fabrication ainsi que le processus lui-même. Celui-ci comprend des entités d'usinage qui sont des entités géométriques avec un processus de fabrication associé. Ces différents états peuvent être représentés par des maillages, des polyèdres

(In-process Model [Xú et al., 2016]), etc. Ce modèle se compose aussi d'un référentiel de programmation, des modèles numériques des outils et des machines utilisés ainsi que les cotations de fabrication.

Le composant pièce réelle comporte une à plusieurs entités usinées qui peuvent être mises en corrélation avec les entités d'usinage du modèle FAO et les entités CAO du modèle CAO. Chacune d'elle peut comporter différents défauts. La machine-outil est le composant permettant la réalisation de la fabrication de la pièce, il est composé de la structure articulée, mais aussi des outils et des porte-pièces. La machine de mesure est l'élément symétrique pour la mesure. Les gammes de fabrication et de mesure sont respectivement constituées des suites ordonnées d'opérations d'usinage et de mesure, ainsi que des outils et des capteurs.

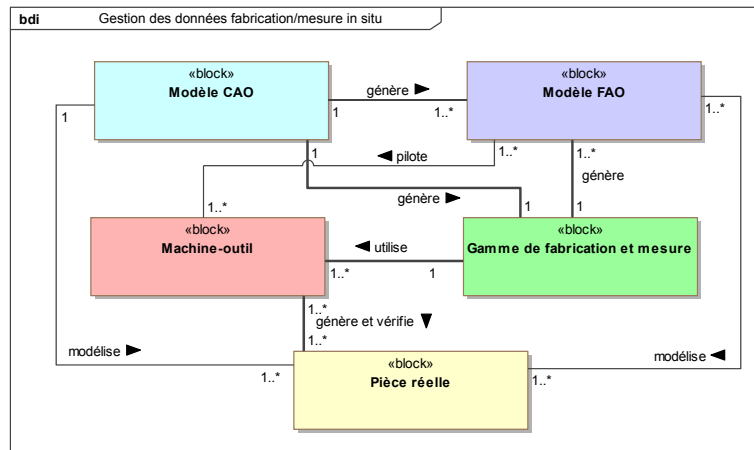


Figure 2.5 – Diagramme de définition de blocs pour la mesure *in-situ*

Dans le cadre de la mesure *in-situ*, le nombre de block est ramené à cinq (figure 2.5). La simplification provient de la suppression de la machine de mesure et de la réunification des gammes de fabrication et de mesure (figure 2.6). Les échanges de données sont ainsi facilités et les référentiels d'usinage et de mesure unifiés. En effet, la mise en position de la pièce lors de l'usinage est identique à celle utilisée pour la mesure. La modélisation proposée à l'aide du langage sysML permet donc d'identifier à la fois les différents composants et sous composants ainsi que les échanges de données entre ceux-ci. Il est ainsi possible de définir l'ensemble des paramètres pertinents pour chacun de ces composants.

De plus, cette description met en évidence deux points essentiels pour que la mesure *in-situ* puisse être pertinente vis-à-vis d'actions correctives. Premièrement, les données

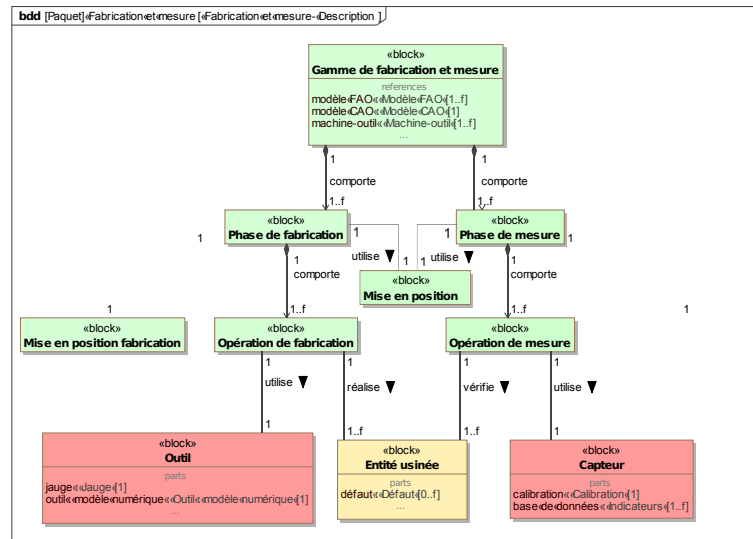


Figure 2.6 – Modélisation de la gamme de fabrication/mesure

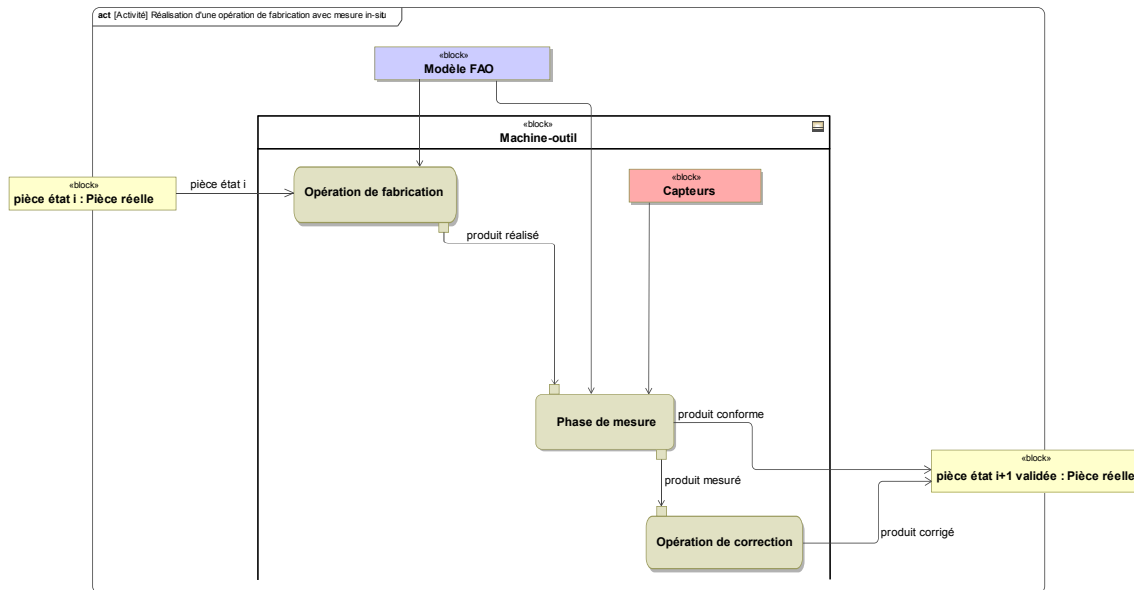
utilisées pour la réalisation de la gamme de mesure ne sont plus issues uniquement du modèle CAO, mais aussi du modèle FAO, de façon à prendre en compte la géométrie de la pièce dans son état final pour la phase considérée. Deuxièmement, les résultats de mesure doivent être intégrés directement au modèle FAO imposant des méthodes de recalage ou de fusion de données dans le cas de données non homogènes.

Un avantage de la modélisation sysML est de pouvoir représenter de façon homogène les données, mais aussi le séquençement des opérations à l'aide des diagrammes d'activité. Ces diagrammes sont présentés au paragraphe suivant.

2.2 Description des activités

À partir des différents composants définis précédemment, l'ordonnancement des opérations d'usinage et de mesure peut être représenté à l'aide d'un diagramme d'activités (figure 2.7). Dans la modélisation que nous proposons, trois activités sont présentes au sein du moyen de production (machine-outil). La première activité est une opération d'usinage, suivie d'une phase de mesure *in-situ* permettant de contrôler le résultat de l'opération d'usinage et finalement une activité éventuelle correspondant à une opération de correction.

Les travaux sur la modélisation des opérations de mesure dans un contexte *in-situ* présentés ici, mettent en évidence les échanges de données à privilégier afin de mettre en place de façon efficace ce type de mesure. Ainsi, la mesure doit s'appuyer sur le modèle

Figure 2.7 – Diagramme d’activité pour la mesure en contexte *on-machine*

FAO et délivrer les résultats dans ce même repère. Enfin, la phase de mesure nécessite de sélectionner un capteur en fonction de la caractéristique attendue (défini dans le modèle FAO). Cette problématique de sélection de capteurs fait l’objet du paragraphe 2.3. Ce choix doit permettre d’aboutir à la sélection du capteur permettant un temps de mesure minimal et présentant des caractéristiques (justesse, bruit, résolution) adaptées au défaut à mesurer. L’une des difficultés concerne alors la prédiction des défauts rencontrés en termes d’échelle et de localisation sur la pièce. De plus, même avec un choix judicieux de capteurs, cette phase de mesure reste longue et pénalisante dans la mesure où l’immobilisation du moyen de production pour la mesure pouvant devenir prédominante sur le temps d’usinage. Nous proposons donc d’ajouter une opération de pré-mesure (figure 2.8), cette opération ayant pour objectif de déterminer la présence ou non de défaut sur la pièce et de ne réaliser ainsi la mesure que si nécessaire. Les travaux concernant cet outil de localisation et de détection de défauts sont présentés au paragraphe 3.3.2.

2.3 Sélection de capteurs

La sélection des capteurs sans contact et plus généralement des systèmes de numérisations (c’est-à-dire un capteur associé avec un porteur) doit être menée en fonction de critères non subjectifs. Il est donc nécessaire de construire des indicateurs objectifs permettant la comparaison entre les systèmes. Cette activité de qualification et d’analyse

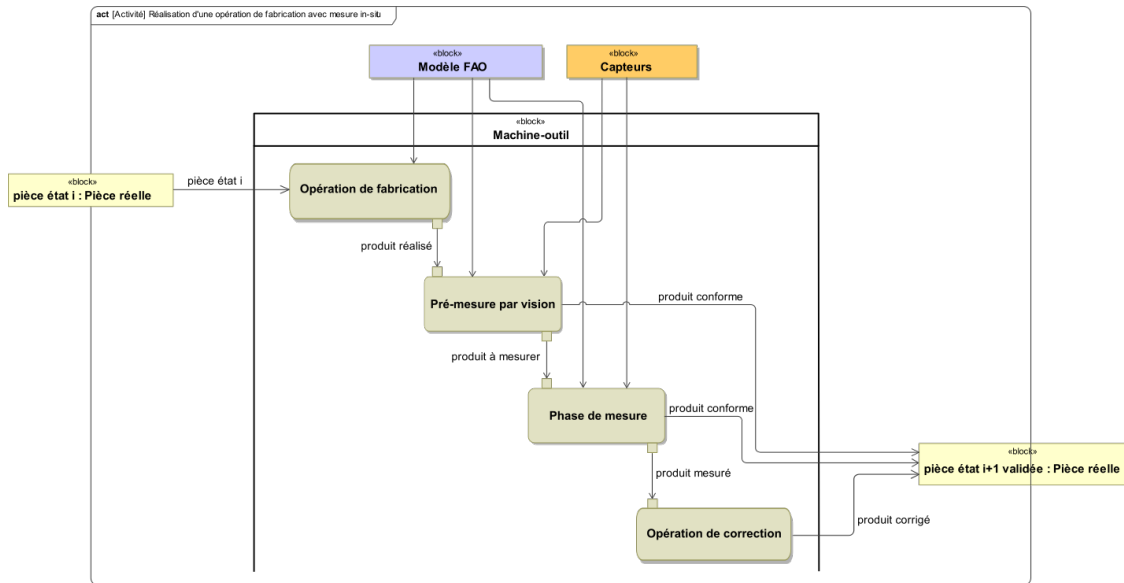


Figure 2.8 – Diagramme d'activité avec outil de pré mesure

de la performance des systèmes est un élément identitaire de l'équipe Geo3D. Ces travaux font l'objet d'échanges avec le milieu industriel au travers du **G**roupe de **R**éflexion des **I**ndustriels sur la **M**esure **S**ans **C**ontact (**GRIMSC**). Ce groupe que je co-anime avec C. Lartigue, comprend SNECMA, Airbus Group, Dassault Aviation et Aircelle. Ces échanges permettent de faire émerger de nouveaux champs d'application et de nouvelles contraintes vis-à-vis de la qualification des systèmes.

Dans ce contexte, il est proposé de définir trois catégories principales d'indicateurs. Certains d'entre eux sont directement construits à partir des facteurs intrinsèques, tandis que d'autres résultent d'un protocole spécifique.

Les **indicateurs d'aptitude**, ils représentent l'aptitude du système en fonction de l'échelle de mesure, les propriétés de la pièce (rigidité, couleurs, matériaux ...), l'accessibilité et l'environnement de mesure. Les **indicateurs de qualité**, ils représentent la qualité des données acquises comme le bruit de numérisation, la justesse. Enfin, les **indicateurs opérationnels** sont associés à la performance d'acquisition, comme la complétude, la densité de points, ou la vitesse d'acquisition. Ainsi, il est possible d'associer pour chaque système de numérisation S_i un vecteur regroupant l'ensemble de ces indicateurs $\mathbf{Q}^i = [q_1^i, \dots, q_n^i]^t$ et ainsi de définir une base de données capteur contenant ces indicateurs. Le protocole **Qualipso** permettant de remplir cette base de données à partir d'indicateurs est défini dans les travaux de thèse de N. Audfray [Audfray, 2012]. Mon intervention dans ces travaux, s'est tout d'abord attaché à rendre opérationnel ce

protocole sous la forme de toolbox Matlab[®]. J'ai ensuite pu apporter une démarche de sélection et l'approche multi-capteurs à ce travail.

2.3.1 Méthodologie de sélection [Mehdi-Souzani et al., 2016]

Actuellement, la sélection d'un système de numérisation en regard d'une application, résulte du choix d'un expert et de son propre savoir-faire. Afin de tirer profit de ses connaissances et afin de le rendre utilisable par les différents utilisateurs, nous avons proposé avec C.M. Souzani, C. Lartigue et P. Bourdet une méthodologie de sélection de capteurs s'appuyant sur la construction d'une base de données d'applications, définie à partir de deux listes de paramètres :

- Les paramètres d'aptitude : liés à l'aptitude du système pouvant être utilisé pour l'application considérée,
- Les paramètres de performance : liés à l'importance relative des indicateurs qualifiés pour l'application considérée.

Les paramètres d'aptitude sont les variables de décisions du problème de sélection du système de numérisation. Ils permettent d'envisager une restriction des systèmes de numérisation à un ensemble admissible. Pour une application donnée j , les paramètres d'aptitude peuvent être regroupés dans un vecteur $A_j = [a_1^j, \dots, a_n^j]^t$. Ces paramètres sont définis à partir de la connaissance de l'expert. Nous définissons tout d'abord $\mathbf{Q}^i = [q_1^i, \dots, q_n^i]^t$ tel que :

$$\begin{cases} q_k^i = q_k^i & \text{si } q_k^i \text{ doit être minimisé} \\ q_k^i = \frac{1}{q_k^i} & \text{si } q_k^i \text{ doit être maximisé} \end{cases} \quad (2.1)$$

Les valeurs de A_j sont à définir par l'expert de façon à ce que la fonction d'Heaviside $H(a_k^j - q_k^i)$ soit non nulle si le système S^i est admissible pour l'indicateur k . Par exemple, si l'expert estime que l'indicateur k n'est pas pertinent dans le choix du système de numérisation, il suffit de fixer $a_k^j = +\infty$. Les paramètres de performance permettent de définir l'importance relative des indicateurs à travers un vecteur de pondération. Ainsi pour une application j , l'expert définit un vecteur performance $\mathbf{P}^j = [p_1^j, \dots, p_n^j]^t$, avec $p_k^j \geq 0$ et $\sum_{k=1}^n p_k^j = 1$.

À partir de la définition des deux bases de données, l'une liée au capteur $base_{système}$ et l'autre liée aux applications $base_{application}$, il est possible de définir le système S_i le

plus pertinent pour une application j . Le processus de sélection proposé est composé de deux étapes. La première détermine l'ensemble des systèmes admissibles. La deuxième permet la sélection du système optimal en regard de l'application étudiée.

L'étape de restriction de l'ensemble des systèmes aux systèmes admissibles est réalisée par une fonction f_1 construite à partir des paramètres d'aptitude :

$$f_1(i, j) = \prod_{k=1}^n H(a_k^j - q_k^i) \quad (2.2)$$

Si $f_i(i, j)$ est non nulle, alors le système S_i est considéré comme admissible pour l'application A_j . Un sous ensemble des systèmes admissible $S_a(j)$ est ainsi défini :

$$S_a(j) = \{S_i \in base_{système} \mid f_1(i, j) > 0\} \quad (2.3)$$

La deuxième étape concerne l'optimisation d'une fonction de performance f_2 de façon à définir le système le meilleur. Ce système appartenant à $S_a(j)$ doit minimiser la fonction de coût :

$$f_2(i, j) = \mathbf{P}^j \cdot \Delta \cdot \mathbf{Q}^i \quad (2.4)$$

Où Δ est une matrice diagonale définie par $\Delta_{k,k} = \frac{1}{\max_i(q_k^i)}$. Cette matrice est utilisée pour normaliser les indicateurs d'aptitude.

Un des cas d'application de cette méthode de sélection concerne l'équilibrage des vilebrequins par la mesure sans contact [Zuquete Guarato, 2013]. À partir des contraintes issues du calcul de balourd sur données discrètes et des temps de cycle industriels, il a été montré que le capteur Atos Triple scan (projection de franges) est le choix le plus pertinent pour cette application.

La méthode proposée de sélection de capteurs s'appuie sur la définition de deux bases de données. L'une est construite à partir de la réalisation d'un protocole de mesure et permet de mettre en place des indicateurs qualifiant l'aptitude et la qualité du système de numérisation. L'autre permet de capitaliser la connaissance d'expert sur les caractéristiques attendues en fonction de l'application à réaliser. Pour le moment, les caractéristiques liées à la mesure *in-situ* sont des éléments qui restent à déterminer.

De plus, cette approche n'intègre pas, pour le moment, l'association de différents capteurs. Les travaux que je souhaite réaliser évoluant de la mesure à l'aide de capteurs multiples vers la mesure multi-échelles, multi-capteurs.

2.3.2 Association capteur/échelle de défaut [Dubreuil et al., 2014]

Une des premières études réalisées sur la définition de stratégie de mesure multi-capteurs concerne la mise en relation des caractéristiques des défauts à évaluer aux caractéristiques des capteurs. Les défauts géométriques des pièces et/ou des assemblages sont de différentes natures et de différentes échelles et les capteurs sans contact utilisés pour la numérisation sont de technologie et de capacité de mesure différentes (laser plan, projection de frange, capteur confocal, ...). Compte tenu de cette diversité, il devient essentiel de faire le lien entre le capteur et sa capacité à mesurer des défauts types et/ou des échelles de défauts (défauts de forme, rugosité, jeux...). Nous avons entamé une étude en ce sens en évaluant la capacité de 3 moyens de mesure différents pour la mesure de défauts induits par l'usinage [Dubreuil et al., 2014].

Cette étude comparative réalisée à partir d'une pièce usinée, comprenant un ensemble de déviations géométriques classiquement rencontrées (décalage, défaut de forme, hauteur de crête), a pour objectif de lier la caractéristique à mesurer à un ou des systèmes de mesure. Pour cette étude, trois capteurs différents sont utilisés : un capteur chromatique confocal, un capteur laser plan et un système de photogrammétrie dense basé sur de la corrélation d'image [Dubreuil, 2013]. Les résultats ont mis en évidence que le système laser plan est le plus pertinent pour une majorité de macro-défauts. Le bruit de mesure relativement élevé ($\sim 0,1mm$) limite l'identification des défauts de faibles amplitudes. De plus, cette étude fait apparaître que les systèmes de photogrammétrie dense, bien que ne disposant pas encore d'une incertitude suffisante pour la mesure, permettent une localisation très rapide de ceux-ci. Il est alors envisagé de les intégrer dans une gamme de mesure multi-capteurs multi-échelles comme outil d'aide à la décision et à la planification de trajectoire de mesure. Le développement de cet outil est ainsi présenté au paragraphe 3.3.2.

Le contexte particulier de la mesure *in-situ* nécessite une bonne maîtrise de l'efficacité du contrôle proposé. Les travaux et modélisations présentés dans cette partie ont ainsi pu mettre en évidence que le compromis entre temps de mesure et la précision est amélioré par :

- Une meilleure interopérabilité entre les opérations d'usinage et les opérations de mesure,
- La mise en place d'un système de mesure pour la détection de défaut

— La mise au point de méthodes de sélection de capteurs

3 Intégration et qualification des capteurs pour la mesure *in-situ*

Cette partie présente les travaux réalisés pour l'intégration et la qualification de capteurs dans le contexte de la mesure *in-situ*. En effet, ce contexte particulier impose l'utilisation d'un porteur non conventionnel, la machine-outil, dont les caractéristiques géométriques et les erreurs volumétriques ne sont pas nécessairement équivalentes à une MMT. L'environnement de mesure (éclairage, poussière) est un élément supplémentaire pouvant aussi influencer la mesure.

Afin de pouvoir assurer l'orientation multi-capteurs multi-échelles des travaux sur la mesure, plusieurs capteurs ont été intégrés. En accord avec l'étude présentée au paragraphe 2.3.2, le choix s'est naturellement porté sur un capteur chromatique confocal, un capteur laser plan et un système de vision. Ces trois intégrations sont maintenant présentées.

3.1 Mesure par capteur chromatique confocal [Quinsat and Tournier, 2012]

Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'intégration de capteurs chromatiques confocaux dans les machines outil. Ces capteurs, appelés aussi crayons optiques, permettent de mesurer l'altitude d'un point avec une résolution inférieure au micromètre. Les travaux concernant l'intégration de crayon optique pour de la mesure *in-situ* sont motivés par la volonté de maîtriser les gammes de polissage automatique sur machine-outil 5 axes décrits au paragraphe 4 du chapitre 1. En effet, lors de ces opérations de polissage, il est nécessaire de contrôler si l'état de surface final pour un papier de grain donné a bien été atteint avant de passer à un grain plus fin. Dans la configuration que nous proposons, le crayon optique est monté dans la broche de la machine-outil à l'aide d'un porte-outil dédié (figure 2.9). Les mesures sont ainsi réalisées selon l'axe Z de la machine correspondant à l'axe de la broche. Le capteur est connecté à son contrôleur par une fibre optique, et la mesure fournie par le contrôleur est enregistrée à l'aide une interface programmée en visual-basic. La mesure finale de la surface est issue d'un ensemble

de profils obtenus par balayage dans des plans parallèles à l'axe Z . Il peut s'agir de plans xz ou yz . La topographie est ensuite reconstruite à partir de la grandeur mesurée par le capteur et la vitesse de déplacement programmée supposée constante.

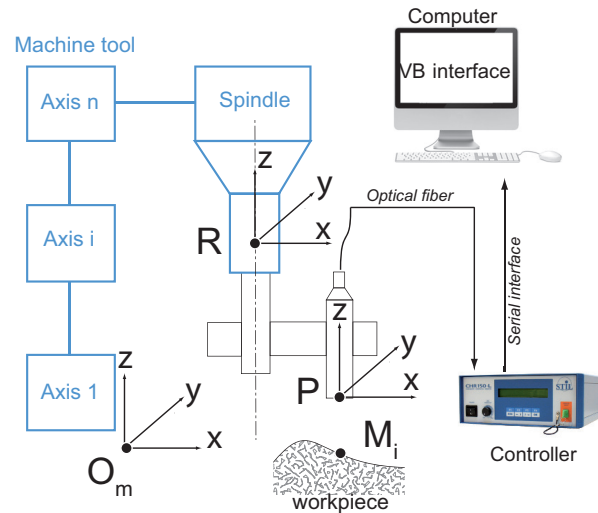


Figure 2.9 – Description du système étudié

Afin d'utiliser ce système de mesure pour la qualification des opérations de polissage automatique, il devient alors nécessaire de qualifier le système de numérisation composé du crayon optique comme capteur, et la machine-outil comme porteur. Pour cela, une première étude concerne l'influence de la répétabilité de l'axe Z de la machine sur les résultats obtenus. En se basant sur la norme ISO 230-2 [Iso 230-2, 2014], différentes mesures réalisées pour trois points correspondant à trois positions de l'axe Z ont été mises en œuvre. Chaque point est mesuré 650 fois et une compensation des effets thermiques liés à la régulation en température de la broche est réalisée. Pour un point donné, les résultats obtenus sont représentés sur la figure 2.10. La distribution (figure 2.10(b)) des variations mesurées est bien gaussienne et l'estimation des écarts types pour les trois mesures est égale à $0,0704 \mu m$, $0,1044 \mu m$ et $0,0714 \mu m$ pour une direction d'accostage descendante \downarrow . Ce qui correspond à une répétabilité de positionnement $R \downarrow$ égale à $0,328 \mu m$.

Une deuxième étude, concernant la qualification de ce système concerne la mesure d'une rayure étalon ($1 \mu m$ de profondeur et $100 \mu m$ de largeur) sur une surface plane polie (ISO 12179 [Iso 12179, 2000] étalon de type A). Cette mesure est effectuée de façon à vérifier l'hypothèse selon laquelle la mesure est bien réalisée selon l'axe Z est correcte et que les défauts de rectitude et de perpendicularité des axes de la machine peuvent

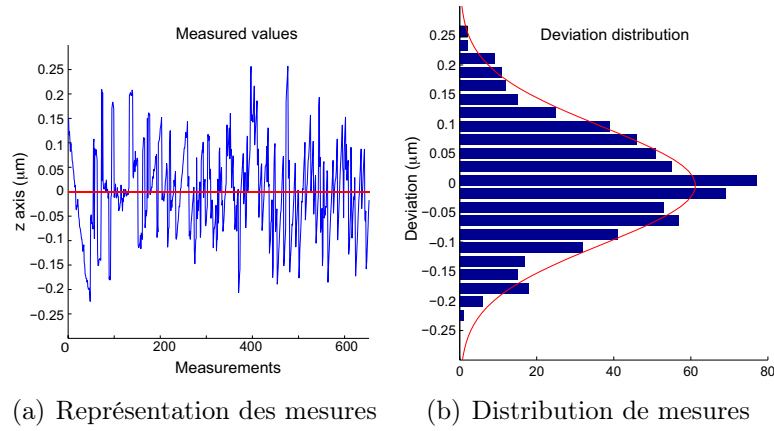


Figure 2.10 – Etude de répétabilité sur l'axe Z

être négligés compte tenu des faibles déplacements. Deux capteurs ont été utilisés pour cette validation. L'un de 22 nm de résolution, utilisé à la fois dans la machine-outil et sur une machine dédiée (microstation STIL) a permis de mesurer des profondeurs respectivement égales à $0,999\text{ }\mu\text{m}$ et $0,919\text{ }\mu\text{m}$. L'autre de 5 nm de résolution donne une mesure de $0,931\text{ }\mu\text{m}$ (figure 2.11). Ces trois mesures très proches permettent de valider le système de mesure développé.

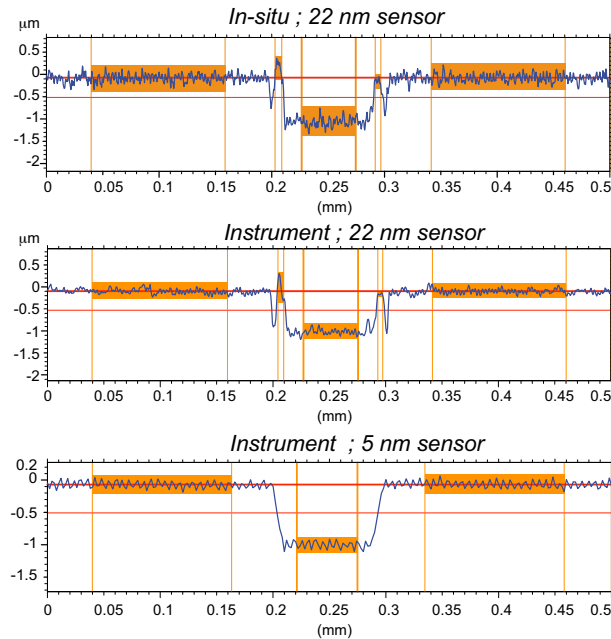


Figure 2.11 – Comparaison des mesures pour une rayure étalon

Ces deux études de qualification, montrent que pour une amplitude de défaut inférieure à $0,3\text{ }\mu\text{m}$ les incertitudes de mesures, et principalement la répétabilité, deviennent trop importantes pour évaluer correctement ce défaut. Or, une gamme complète de po-

lissage pour l'obtention d'une surface complexe polie miroir comporte deux types opérations : prépolissage par abrasion 2 corps puis polissage 3 corps (pâte à diamant et feutrine). Chacune de ces opérations est répétée en diminuant la taille des grains employés. Ainsi, la mesure *in-situ* d'état de surface, à l'aide de ce type de capteur, est donc envisageable pour des opérations de fraisage et de pré-polissage, mais ne permet pas de couvrir la gamme complète de polissage.

Ces travaux sur l'intégration d'un capteur confocal chromatique dans une machine-outil permettent donc de valider l'emploi d'un tel capteur dans le cadre de la mesure *in-situ*, pour des échelles de défaut micrométriques. Nous présentons maintenant une solution pour des défauts d'un ordre supérieur.

3.2 Mesure par capteur laser plan

À la suite des travaux sur la qualification de crayon optique pour la mesure *in-situ*, un capteur laser plan Kreon a été utilisé dans ce même contexte (figure 2.12), le capteur étant monté en lieu et place d'un outil dans la broche de la machine (figure 2.13). La différence principale réside dans le fait qu'un boîtier d'acquisition et de traitement lié au capteur permet le relevé des règles de mesure de la machine-outil.

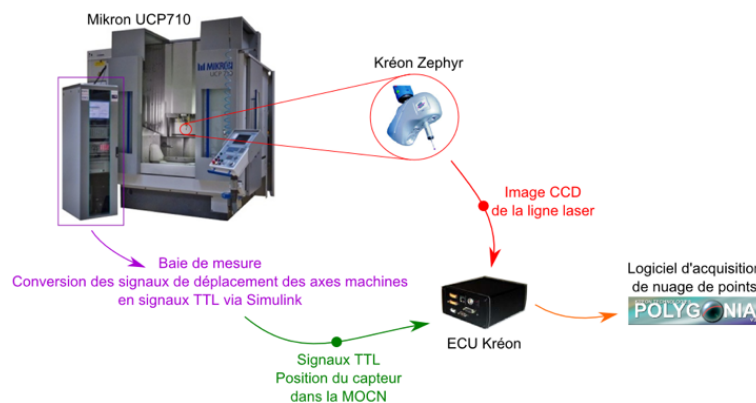
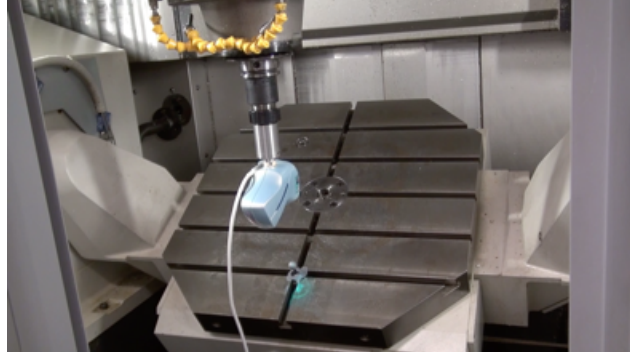


Figure 2.12 – Principe d'intégration du Kreon

La réalisation du protocole de qualification QUALIPSO [Audfray, 2012, Mehdi-Souzani et al., 2016] sur un plan étalon de 100 mm x 50 mm et sur un ensemble de hauteur de marche étalon permet de conclure que le bruit et la justesse de mesure sont équivalents pour les couples (Kreon-MOCN) et (Kreon-MMT), soit respectivement 13 μm (figure 2.14) et 1,3 $\mu m/m$. C'est l'utilisation de la machine-outil sur de faibles courses de la machine-outil qui permet d'obtenir ces résultats. L'utilisation d'étalons



(a) Montage du capteur Kreon dans un porte-outil



(b) Installation dans la broche

Figure 2.13 – Intégration d'un capteur laser plan dans une MOCN

de plus grandes dimensions mettrait certainement en avant des résultats de mesure moins bons avec l'utilisation de la machine-outil. Cette problématique de définition de nouveaux artefacts fait également partie des discussions au sein du GRIMSC pour la qualification des systèmes de mesure sans contact pour la mesure des pièces de grandes dimensions, de type structure aéronautique. Néanmoins, cela permet de valider, pour des pièces de dimensions restreintes, l'utilisation d'un tel capteur. Cette utilisation et plus particulièrement la génération de trajectoire de numérisation sur MOCN est présentée au paragraphe 2.2.2 du chapitre 3 et fait l'objet des travaux de thèse de M. D. Phan.

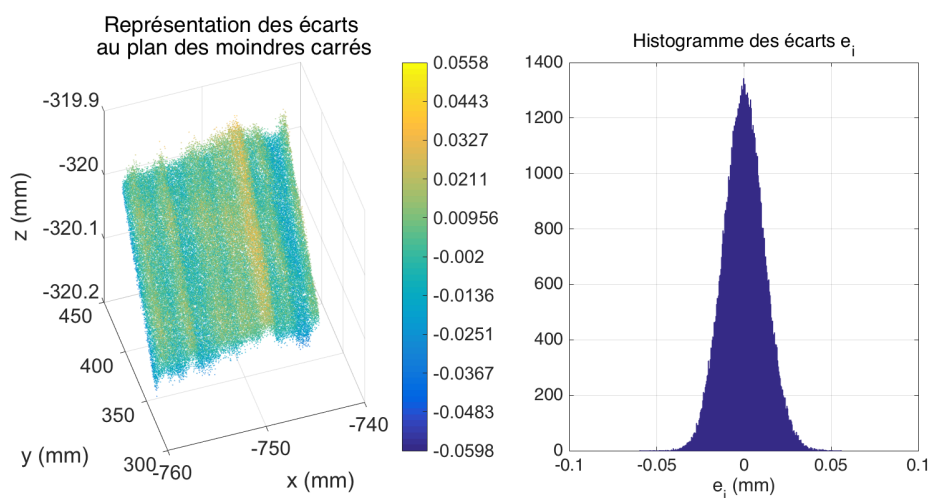


Figure 2.14 – Evaluation du bruit par le protocole Qualipso pour le Kreon KZ25 sur MOCN

3.3 Mesure par système de Vision [Dubreuil, 2016]

Après avoir décrit les travaux portant sur l'intégration et la qualification de capteurs industriels, nous nous intéressons plus particulièrement à la présentation d'un système de vision. Ces travaux ont été initiés afin de répondre en partie au besoin d'interopérabilité entre la mesure et le modèle FAO décrit au paragraphe 2. En ce sens, la particularité du système de vision présenté est de proposer une mesure directement définie dans le repère FAO. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de L. Dubreuil [Dubreuil, 2016]. Une première partie est consacrée à la présentation d'une méthode de calibration originale permettant de lier le repère de la caméra au repère associé à la FAO. Une deuxième partie est consacrée à la description de l'outil de pré-mesure mis au point au cours des travaux de thèse.

3.3.1 Calibration *in-situ* pour système de vision [Dubreuil et al., 2015]

Afin d'améliorer l'interopérabilité entre la mesure avec le modèle FAO et de réduire le temps de traitement des données, il est nécessaire dans le cadre de la mesure *in-situ* de développer un outil permettant de délivrer une information définie dans le repère FAO. Pour réaliser ceci, nous proposons un système de mesure à base de caméras dont les repères de mesures sont liés au repère défini dans la FAO.

3.3.1.a Modèle de caméra

La calibration d'une caméra consiste à identifier un ensemble de paramètres permettant de représenter la transformation de projection des éléments de l'espace sur le capteur de la caméra. Elle permet d'exprimer à partir des coordonnées d'un point en trois dimensions dans un repère de référence ou repère monde R_w , les coordonnées en deux dimensions dans le référentiel de l'image R_p de sa projection selon le centre caméra. Elle représente donc le passage d'un espace \mathbb{R}^3 à un espace projectif \mathbb{P}^2 .

Pour définir cette relation, la caméra est représentée par un modèle de sténopé (figure 2.15). Le repère, lié au centre optique de la caméra et d'axe z l'axe optique, est noté R_c . Il est ainsi possible de définir une transformation de projection P dans le plan de la caméra par rapport au centre de cette dernière. La transformation affine, entre le repère centré dans le plan image R_r et R_p , est quant à elle définie par A . Les déformations de l'image induites par les distorsions sont représentées par une transformation D .

Ainsi, la transformation $M = A.D.P$ correspond à la calibration interne de la caméra et nécessite la détermination de paramètres dits *intrinsèques*. Il s'agit de la focale f_c , des coordonnées du centre de l'image C_{cu} et C_{cv} , de la dimension des pixels s_p , et de leur nombre n_p , ainsi que des paramètres de distorsions k_i (avec $i \in [1; 5]$).

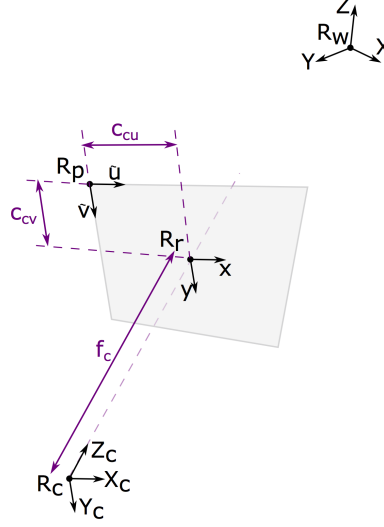


Figure 2.15 – Description du modèle de sténopé

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}_{R_p} = A.D.P.T. \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_w} = M.T. \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_w} \quad (2.5)$$

Enfin, le passage du repère monde R_w au repère caméra R_c est défini à partir d'une rotation R de $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ et d'une translation t correspondantes aux paramètres *extrinsèques*. Cette transformation peut s'écrire sous la forme d'une matrice homogène T (équation 2.6).

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix}_{R_c} = T. \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_w} = \begin{pmatrix} R_{33} & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_w} \quad (2.6)$$

Les techniques de calibration sont relativement bien maîtrisées et de nombreux travaux existent [Tsai, 1986, Faugeras and Toscani, 1987, Ma et al., 1993, Dornaika and Garcia, 1997, Lavest et al., 1999]. Elles sont même accessibles [Bouguet, 2010] sous forme de boîte à outils Matlab[®]. Il s'agit le plus souvent de mettre en correspondance les éléments d'un artefact de calibration avec ses projections dans le plan image pour

différentes configurations. Les paramètres extrinsèques et intrinsèques sont obtenus par la minimisation d'erreur de reprojection. L'une des difficultés d'utilisation des résultats de calibration concerne la définition du repère monde R_w . Souvent associé à l'une des configurations utilisées, il est difficilement matérialisable et n'est pas directement lié aux données issues du modèle FAO. Plus récemment, la méthode développée par B. Beaubier [Beaubier et al., 2014] sur la base de stéréo-corrélation dense permet directement l'utilisation du repère de CAO comme repère de référence. Néanmoins l'artefact de calibration étant la pièce elle-même, il est nécessaire de supposer qu'elle corresponde à sa définition nominale définie dans le modèle CAO.

Or, nous avons montré dans la partie 2, que dans le contexte de la mesure *in-situ*, il est nécessaire d'avoir une très bonne interopérabilité entre les données issues de la mesure et le modèle FAO. Pour ceci, nous proposons une méthode de calibration intégrant des entités liées au porte-pièce et utilisant ainsi le repère FAO comme repère de référence.

3.3.1.b Calibration sur montage d'usinage

Pour un système de vision dédié à la mesure *in-situ*, la procédure de calibration proposée se fonde sur les caractéristiques géométriques de la scène identifiables dans la machine-outil. L'idée est de définir un repère unique pour les mesures, et les opérations d'usinage. En ce sens, nous proposons que le repère de référence R_w coïncide avec le repère dans lequel les opérations d'usinage sont définies, c'est-à-dire le repère FAO.

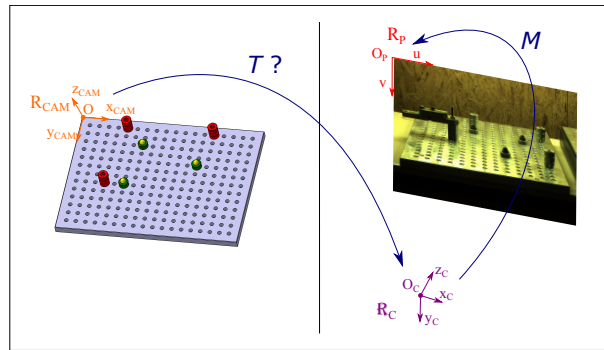


Figure 2.16 – Identification de la transformation T

Nous considérons, de plus, que les paramètres intrinsèques sont fixes et ne varient pas, ainsi la transformation $M = A.D.P$ entre R_p et R_c est complètement définie et peut être déterminée en dehors de la machine. Les travaux proposés portent donc sur l'identification des paramètres extrinsèques, c'est-à-dire de la matrice de transforma-

tion T (figure 2.16). La méthode réalisée est basée sur la mise en correspondance d'un ensemble d'entités 3D composant le montage d'usinage et leur projection dans le plan image. Ces entités sont directement définies dans le modèle FAO. Il s'agit donc d'établir une transformation virtuelle de $R_{CAM} = R_w$ à R_p (figure 2.16). Il est important de noter que les défauts géométriques du porte-pièce sont négligés ou identifiés et que le montage d'usinage réel est assimilé à sa représentation nominale en CAO. Les entités choisies sont celles qui sont le plus facilement identifiables sur des images (par un filtre de Canny et une transformée de Hough), comme celles proposées au tableau 2.1. Finalement, l'ensemble des entités extraites est composé de droites et de points.

Entités 3D	Entité 2D	Élément extrait
Cylindre	2 génératrices	Ligne
Sphère	Cercle	Point
Intersection de 2 plans	Ligne	Ligne
Cercle	Ellipse	Point

Tableau 2.1 – Entités identifiables sur les images

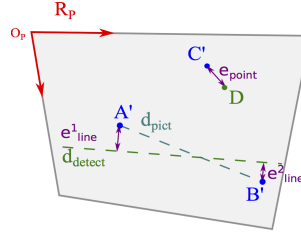


Figure 2.17 – Description du calcul de l'erreur de projection

Pour chacune des droites, deux erreurs sont calculées, elles correspondent à la distance des points extrêmes du segment projeté d_{pict} à la ligne extraite d_{detect} (équation. 2.7 et figure 2.17). Dans le cas où l'entité extraite est un point, l'erreur étudiée est directement la distance entre le point projeté et le point extrait (équation. 2.7 et figure 2.17).

$$\begin{cases} e_{point} &= d(C', D) \\ e_{axis}^1 &= d(A', d_{detect}) \\ e_{axis}^2 &= d(B', d_{detect}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Pour un ensemble de m lignes et n points, il est possible de définir un vecteur erreur E de dimension $2 \cdot m + n$. La calibration, c'est-à-dire la recherche de la transformation T , revient à minimiser la fonction $F = E^t \cdot E$. Cette minimisation est une optimisation au sens des moindres carrés, elle est réalisée selon un algorithme de type Newton-Raphson.

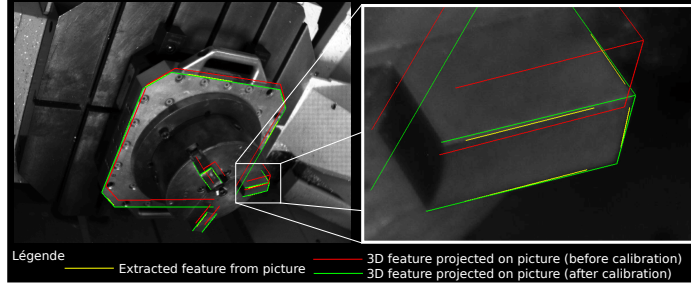


Figure 2.18 – Calibration dans l’environnement d’une machine-outil

Cette approche est appliquée sur le montage présenté à la figure 2.18. Les paramètres intrinsèques sont déterminés par un outil Matlab[®] [Bouguet, 2010]. La transformation initiale T_{init} est définie par l’appariement manuel de six points entre le modèle CAO et l’image. Les entités 3D du montage sont projetées sur l’image selon l’équation 2.5, donnant les éléments en rouge sur la figure 2.18. Après optimisation de la fonction erreur F , les paramètres extrinsèques trouvés permettent d’obtenir les éléments verts. La position des entités projetées est proche de celle identifiée sur l’image, validant ainsi la méthode de calibration proposée. La projection d’éléments différents de ceux utilisés pour la calibration (figure 2.19) permet de quantifier le résultat de calibration. L’erreur moyenne observée ne dépasse pas 0,24 pixels en valeur absolue dans les deux directions u et v pour une image de taille 3200 x 4500 pixels.

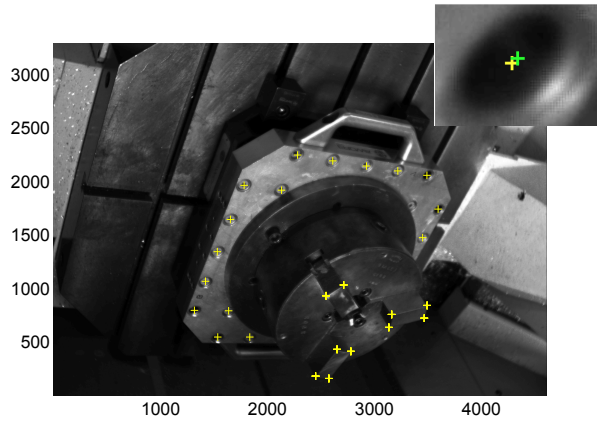


Figure 2.19 – Représentation de l’erreur de reprojection

Une autre façon d’étudier la qualité de la calibration réalisée et de calculer le bruit de calibration [Lavest et al., 1999]. Ce calcul se base sur l’estimation d’un vecteur résiduel V défini à partir de $J = \left[\frac{\partial E}{\partial \Phi} \right]_{\Phi}$ par :

$$V = (I - J \cdot (J^t \cdot J)^{-1} \cdot J^t) \cdot E(\Phi) \quad (2.8)$$

Il est ainsi possible de définir une estimation du bruit de calibration σ_0 (pixel) pour r la redondance du système (différence entre le nombre d'équations indépendantes et le nombre d'inconnues).

$$\sigma_0^2 = \frac{V^T \cdot V}{r} \quad (2.9)$$

À titre d'exemple, pour le cas présenté à la figure 2.18, les résultats obtenus sont respectivement de $\sigma_0^g = 1,64 \text{ pixel}$ pour la calibration de la caméra gauche et $\sigma_0^d = 1,68 \text{ pixel}$ pour la caméra de droite, confirmant une bonne qualité de calibration. Néanmoins, l'un des points clés de l'utilisation de cette méthode pour la mesure *in-situ* concerne la sensibilité des résultats de calibration par rapport aux variations des conditions de mesure des entités du montage d'usinage. Une étude de sensibilité est donc proposée au paragraphe suivant.

3.3.1.c Étude de la sensibilité de la méthode

L'étude de sensibilité est réalisée en considérant les variations possibles en position et orientation des entités 2D extraites. En effet, les conditions d'éclairage, de réglage de la caméra, ainsi que la portion d'image utilisée pour l'extraction de l'entité peuvent influencer la détermination de cette dernière. Ainsi, une incertitude est associée à la définition des entités extraites sous la forme d'une distribution gaussienne identifiée à partir de différentes mesures. D'autre part, la procédure de calibration des paramètres intrinsèques utilisée fournit une incertitude sur la détermination de ceux-ci. Ainsi, une simulation de type Monte-Carlo peut être conduite (figure 2.20).

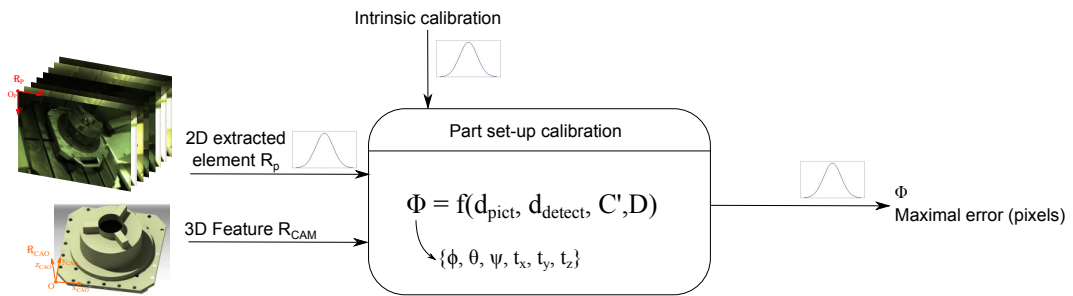


Figure 2.20 – Description de la simulation de Monte-Carlo

Deux études de sensibilité sont menées, l'une prenant en compte l'ensemble de variations possibles, l'autre ne prenant en compte que l'influence de l'extraction des entités 2D. Les résultats obtenus sont présentés respectivement sur les figures 2.21(a) et 2.21(b)

ainsi que sur les figures 2.21(c) et 2.21(d). Ils montrent clairement que la sensibilité de la méthode de calibration proposée est faible par rapport aux évolutions des conditions de mesure, la détermination des paramètres intrinsèques ayant finalement plus d'influence.

Néanmoins, il faut aussi noter que l'une des sources d'erreur, non étudiée ici, concerne la géométrie du porte-pièce. Les dimensions et les positions des entités du montage ne correspondent pas exactement au nominal défini dans la CAO. Il est nécessaire pour une bonne application de la méthode de bien identifier la géométrie réelle du porte-pièce.

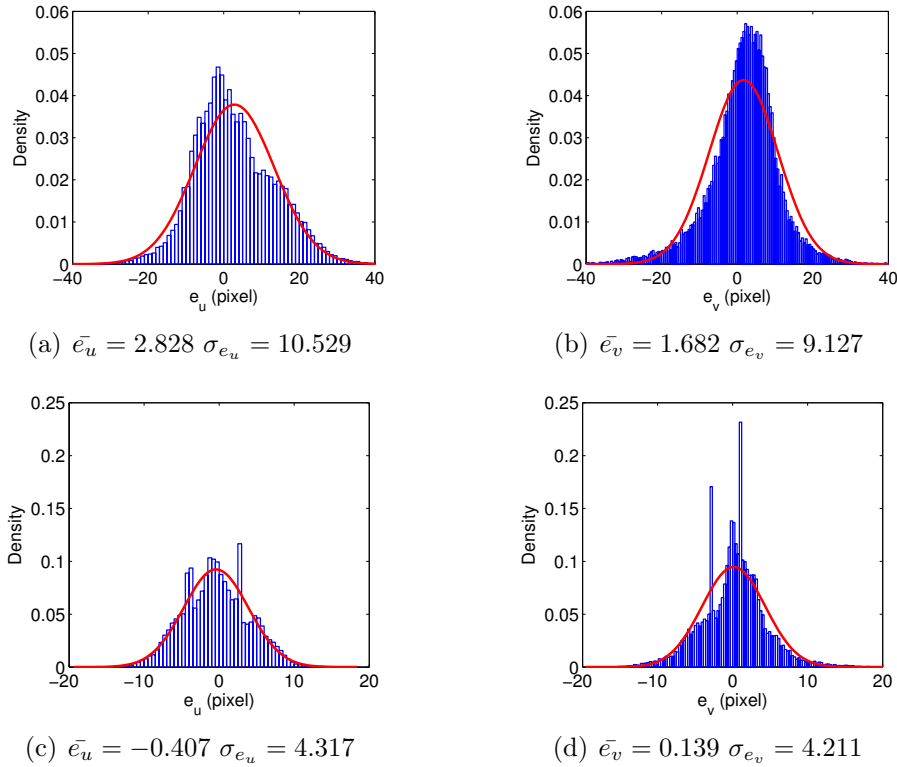


Figure 2.21 – Représentation des distributions des erreurs de reprojection en considérant toutes les sources d'incertitudes (a) et (b) ou uniquement l'extraction des entités (c) et (d)

Trois technologies différentes de capteur ont ainsi été intégrées dans une machine-outil : capteur chromatique confocal, capteur laser plan, caméra. Les deux premiers permettent d'obtenir un résultat de mesure sous la forme d'un ensemble de points. Le troisième délivre une information correspondant à une image et son utilisation sera plus particulièrement décrite dans la partie suivante (partie 3.3.2). Compte tenu des résolutions respectives et de l'étude décrite au paragraphe 2.3.2, ces différents capteurs permettent de mesurer des défauts d'ordre différent. Ainsi, associés aux capteurs à contact déjà classiquement intégrés dans les machines outil, les travaux réalisés sur l'intégra-

tion des capteurs sans contact dans un environnement *in-situ* permettent d'envisager la possibilité d'exécuter des gammes de mesure multi-capteurs dans ce contexte particulier.

3.3.2 Apport de la vision comme outil de détection de défaut

Les travaux présentés dans cette partie concernent l'utilisation d'un système de pré-mesure pour la détection de défauts d'usinage. Le système envisagé est composé de deux caméras (figure 2.22) positionnées dans la machine-outil et s'appuie sur la méthode de calibration présentée au paragraphe 3.3.1.b. L'idée originale basée sur la stéréo corrélation d'image a pour objectif de déterminer les zones de la pièce ne correspondant pas à la géométrie définie dans le modèle FAO. Le critère de corrélation employé est défini dans un premier paragraphe. Dans un second temps, une méthode de sélection des zones présentant des défauts est proposée.

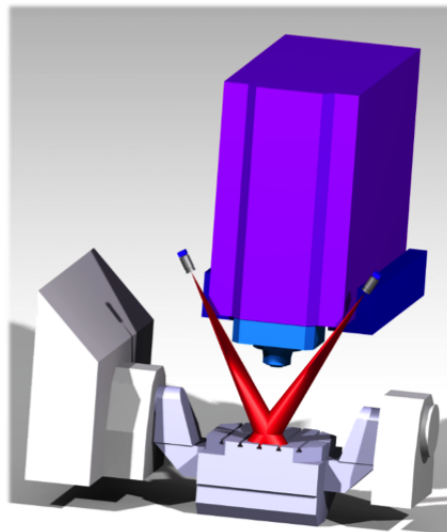


Figure 2.22 – Présentation du système de mesure

3.3.2.a Score de corrélation

Les techniques de corrélation d'image consistent à comparer les niveaux de gris des pixels de deux images pour différentes zones d'intérêt (ROI) données. Cette comparaison est réalisée sur la base du calcul d'un score de corrélation pour chacune de ces zones. La forme de la ROI est, la plupart du temps, rectangulaire et identique pour les deux images considérées. Dans certains cas, il est nécessaire de considérer des géométries différentes dans les deux images de façon à prendre en compte la déformation de la zone étudiée

entre les deux prises de vue [Sutton et al., 2009] comme lors de mesure de déformations dans le cadre d'essais mécaniques. Pour de la mesure par stéréo-vision, il faut prendre en compte le fait que la projection de la pièce étudiée dans le plan des deux caméras ne présente pas la même géométrie. Il devient alors nécessaire de modifier la géométrie de la ROI dans l'une des deux images de façon à calculer un score de corrélation reflétant bien la comparaison d'une même portion de la pièce étudiée [Harvent, 2010, Harvent et al., 2013]. À partir de la méthode de calibration précédemment présentée (paragraphe

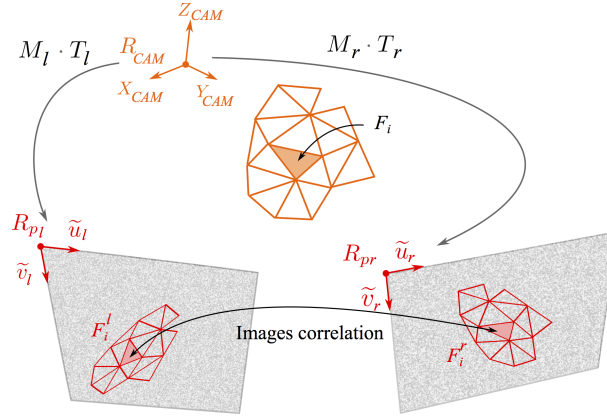


Figure 2.23 – Projection du modèle CAO

3.3.1.b), il est possible de projeter directement une portion de la pièce étudiée dans le plan de chacune des caméras d'un système de stéréo-vision (figure 2.23). Pour une représentation de la pièce sous une forme facettisée de maillage triangulaire, la projection dans les deux plans images (figure 2.24) de chacune des facettes, donne des triangles de dimensions et d'orientations différentes (figure 2.24(b) et 2.24(c)), en fonction de la position et de l'orientation de la facette par rapport à chacun des axes optiques.

Pour le calcul du score de corrélation, nous proposons donc de définir la ROI non plus dans les plans images, mais directement sur le modèle numérique de la pièce étudiée. Les projections de la zone considérée peuvent ainsi être comparées sans avoir à utiliser une déformation supplémentaire. Une méthode simple pour définir la ROI est de choisir directement une face $facette_i$ du maillage représentant la pièce. Nous choisissons de discrétiser la ROI ainsi définie de façon à obtenir un ensemble de n points d'évaluation $X_{i,j}$ (figure 2.24(a)). Le score de corrélation pour la $facette_i$ peut ainsi être calculé de la façon suivante :

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^n \left(f^g(x_{i,j}^g) - f^d(x_{i,j}^d) \right)^2 \quad (2.10)$$

Où $x_{i,j}^g$ et $x_{i,j}^d$ représentent respectivement les projections de $X_{i,j}$ dans les deux camé-

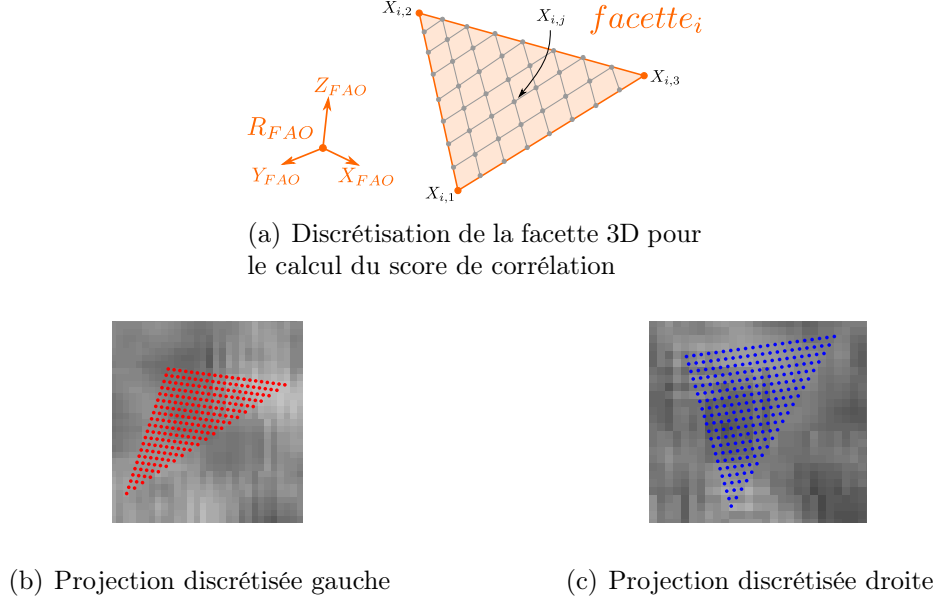


Figure 2.24 – Définition de la ROI et de sa projection

ras du système de stéréo-vision et $f^g(x_{i,j}^g)$ et $f^d(x_{i,j}^d)$ les intensités des niveaux de gris correspondants. Ces valeurs sont obtenues par interpolation bilinéaire des pixels autour des points projetés.

Le score de corrélation ainsi calculé est similaire à un score de type SSD (Sum of Squared Differences), un calcul de type ZSSD (Zero-mean Sum of Squared Differences) peut tout aussi bien être réalisé en retranchant la moyenne des niveaux de gris dans chacune des images. Ainsi, si la pièce mesurée est conforme à la pièce définie dans le modèle CAO pour la ROI considérée, le paramètre χ_i^2 doit être faible ; s'il existe un défaut sur la pièce alors χ_i^2 sera plus élevé. Le calcul de score de corrélation peut ainsi être mené sur l'ensemble des parties visibles de la pièce, et permettre une détection des zones présentant des écarts par rapport au modèle numérique.

À titre d'exemple, nous proposons d'analyser une pièce présentant volontairement un défaut. Ainsi, les scores de corrélations sont calculés pour les images d'une pièce composée d'un tronc de cône et d'un plan (figure 2.25(a)) que nous modélisons uniquement par un plan dans le modèle CAO (figure 2.25(b)). La géométrie de la pièce dans le montage d'usinage étant identifiée par une mesure sur MMT, les scores de corrélation attendus doivent donc être faibles pour la partie plane et de plus en plus élevés sur la partie conique (figure 2.27(b)). Les résultats de mesure présentés à la figure 2.27(a) illustrent bien ceci pour la partie plane centrale. Concernant la partie conique, certaines facettes présentent bien un score de corrélation élevé, mais d'autres non. La présence de défauts

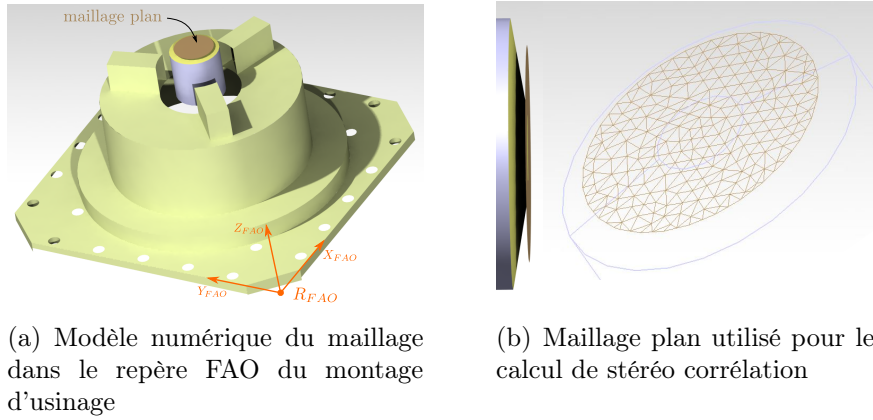


Figure 2.25 – Description de l'exemple étudié

se traduit ici par des variations importantes du score de corrélation. Ceci est principalement dû à la combinaison de deux facteurs. La présence du défaut tout d'abord, mais aussi des erreurs de calibration qui ne permettent pas une projection parfaitement localisée dans les deux plans images de la facette étudiée, et ainsi le calcul correct du score de corrélation.

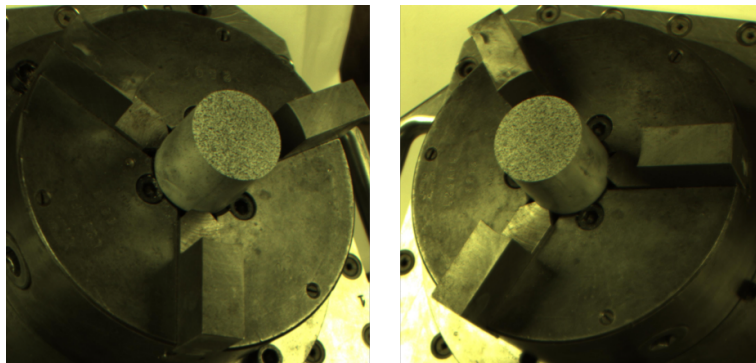


Figure 2.26 – Images gauche et droite de la pièce étudiée

Cet exemple montre que l'étude seule du score de corrélation n'est pas suffisante pour une détection correcte des défauts. La recherche des zones présentant un score de corrélation élevé n'est pas une condition suffisante. Ainsi, une méthode de détection est proposée au paragraphe suivant. Elle est basée sur l'optimisation de la position et de l'orientation de la facette afin de minimiser le score de corrélation. La détection des défauts sera réalisée à partir d'un seuillage sur les déplacements obtenus.

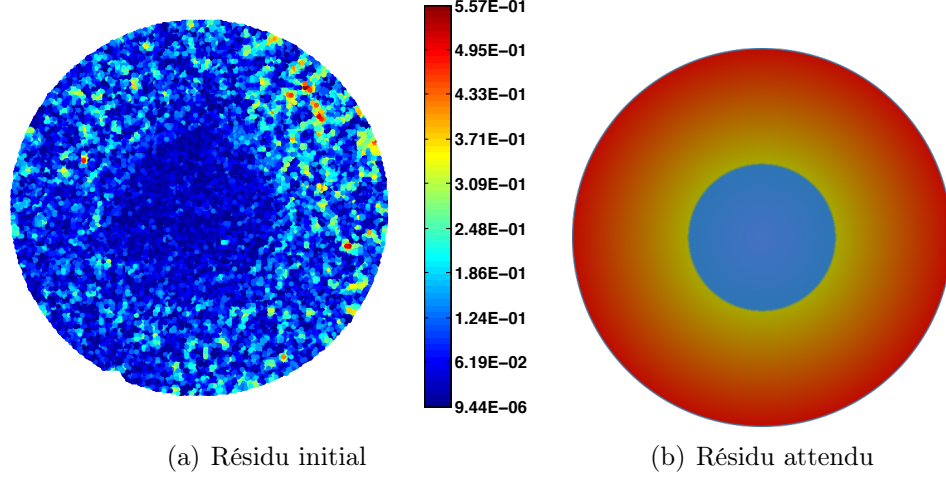


Figure 2.27 – Cartographies des résidus de corrélation mesurés et attendus

3.3.2.b Optimisation et sélection

Nous définissons donc pour une facette i la position de son barycentre X_{B_i} dans le repère FAO, et son orientation par la normale à la facette \mathbf{n}_i (figure 2.28). Afin de réaliser l'optimisation du positionnement de la facette dans le repère FAO, nous introduisons le petit déplacement associé à la facette i défini dans le repère FAO [Bourdet et al., 1996]. Il est noté sous la forme d'un vecteur \mathbf{dB}_i . Ce petit déplacement permet de modéliser le mouvement de corps rigide de la facette pour une translation $\mathbf{t} = [du_i \ dv_i \ dw_i]^t$ et trois rotations $d\alpha_i, d\beta_i, d\gamma_i$ supposées suffisamment petites pour linéariser au premier ordre la matrice de rotation correspondante.

$$\mathbf{dB}_i = [d\alpha_i \ d\beta_i \ d\gamma_i \ du_i \ dv_i \ dw_i]^t \quad (2.11)$$

Pour un point d'évaluation $X_{i,j}$ dans le repère FAO, $x_{i,j}^g$ et $x_{i,j}^d$ ses projections respectives dans les plans images (figures 2.24(a)), nous notons les projections des déplacements, associés à \mathbf{dB}_i , $dx_{i,j}^g$ et $dx_{i,j}^d$. À partir de l'équation 2.10, le score de corrélation se calcule de la façon suivante :

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^n (f^g(x_{i,j}^g + dx_{i,j}^g) - f^d(x_{i,j}^d + dx_{i,j}^d))^2 \quad (2.12)$$

Une linéarisation au premier ordre de l'équation précédente permet donc d'obtenir la fonction que l'on cherchera à minimiser.

$$\chi_{lin,i}^2 = \sum_{j=1}^n (f^g(x_{i,j}^g) + [\mathbf{G}^g](x_{i,j}^g) - f^d(x_{i,j}^d) - [\mathbf{G}^d](x_{i,j}^d))^2 \quad (2.13)$$

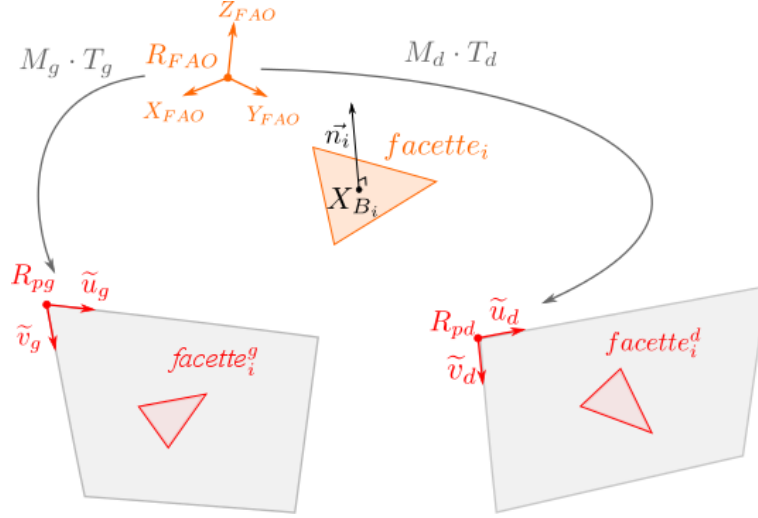


Figure 2.28 – Principe de l'optimisation en position et orientation de chacune des facettes

avec

$$G^g(x_{i,j}^g) = (\nabla f^g \cdot dx_{i,j}^g)(x_{i,j}^g) \quad , \quad G^d(x_{i,j}^d) = (\nabla f^d \cdot dx_{i,j}^d)(x_{i,j}^d) \quad (2.14)$$

et

$$dx^{g,d} = \frac{\partial x_{i,j}^{g,l}}{\partial X_{i,j}} \cdot \frac{\partial X_{i,j}}{\partial B_i} \cdot d\mathbf{B}_i \quad (2.15)$$

Ainsi, la minimisation du score de corrélation χ_i^2 de chacune des facettes peut être obtenue par une méthode de Newton-Raphson, les petits déplacements $d\mathbf{B}_i$ étant calculés à chacune des itérations. L'application de cette méthode sur le cas de la pièce composée d'un plan et d'un cône (figure 2.25(a)) montre bien une diminution du score de corrélation pour l'ensemble des facettes (figure 2.29(b)). Des variations existent toujours sur le score de corrélation, elles sont principalement dues à l'hétérogénéité de l'éclairage.

3.3.2.c Sélection des zones de défaut

La méthode d'optimisation présentée précédemment permet d'obtenir une position et une orientation, pour chacune des facettes étudiées, minimisant le score de corrélation associé. Cette nouvelle configuration induit donc un déplacement des projections de cette dernière dans les deux plans caméra par rapport à celles correspondantes à la configuration initiale. Il est alors possible de définir un déplacement en pixel D_i^g et D_i^d de la facette étudiée pour chacune des caméras. Pour une caméra donnée, ce déplacement est défini comme étant le maximum des déplacements des sommets définissant la projection de la facette.

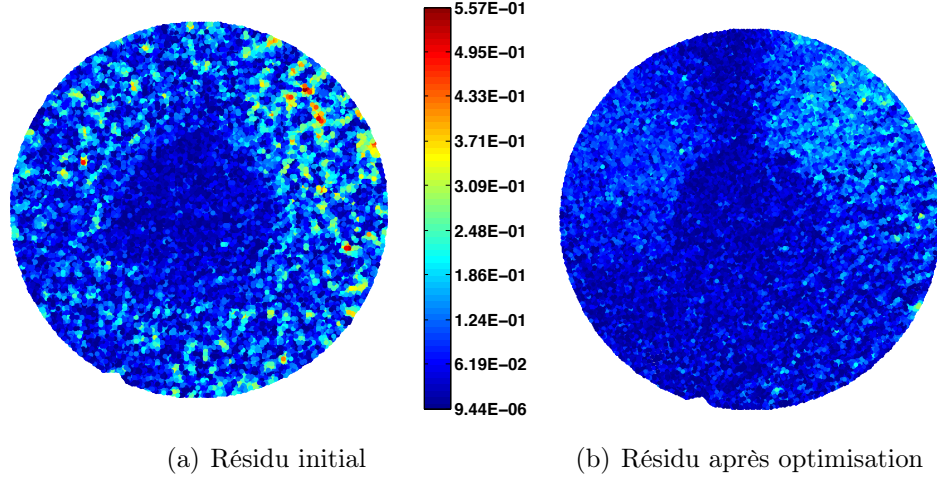


Figure 2.29 – Cartographies des résidus de corrélation

Pour effectuer la sélection des zones avec défauts, nous nous appuyons sur le bruit de calibration (équation 2.9) défini dans la partie 3.3.1; σ_0^g pour la calibration de la caméra gauche, et σ_0^d pour la calibration de la caméra droite. Ce bruit de calibration correspond finalement à la résolution de notre système de mesure. Si D_i^g ou D_i^d est supérieur aux bruits de calibration en pixel (respectivement σ_0^g et σ_0^d) alors la zone de la pièce correspondant à la facette présente un défaut. Si le déplacement est inférieur, alors il est dans l'incertitude de la calibration et la pièce ne présente pas de défaut. En appliquant cette méthode sur l'exemple précédent, à partir des déplacements obtenus (figure 2.30(a) et 2.30(b)), il est possible de retrouver (en bleu sur la figure 2.30(c)) les facettes correspondantes à la partie conique. La frontière entre la partie plane et la partie conique est représentée par un cercle rouge sur cette même figure.

Les travaux sur la détection de défauts, présentés dans cette partie, sont basés sur la mise au point d'un système de mesure par stéréo corrélation. Ce système s'appuie sur une méthode de calibration permettant la mise en correspondance des données acquises directement dans un repère lié au modèle FAO. Il est alors possible, à partir de la définition d'un score de corrélation, de comparer les images de la pièce usinée avec son modèle numérique simulé. La recherche de la forme locale permettant de minimiser ce score de corrélation permet de détecter les zones ne correspondant pas au nominal et donc synonyme de défaut. De par l'utilisation d'une représentation facettisée de la pièce, l'originalité de ce système est de permettre une mesure compatible avec les représentations des simulations réalisées en FAO améliorant ainsi l'interopérabilité entre les mesures et les données géométriques.

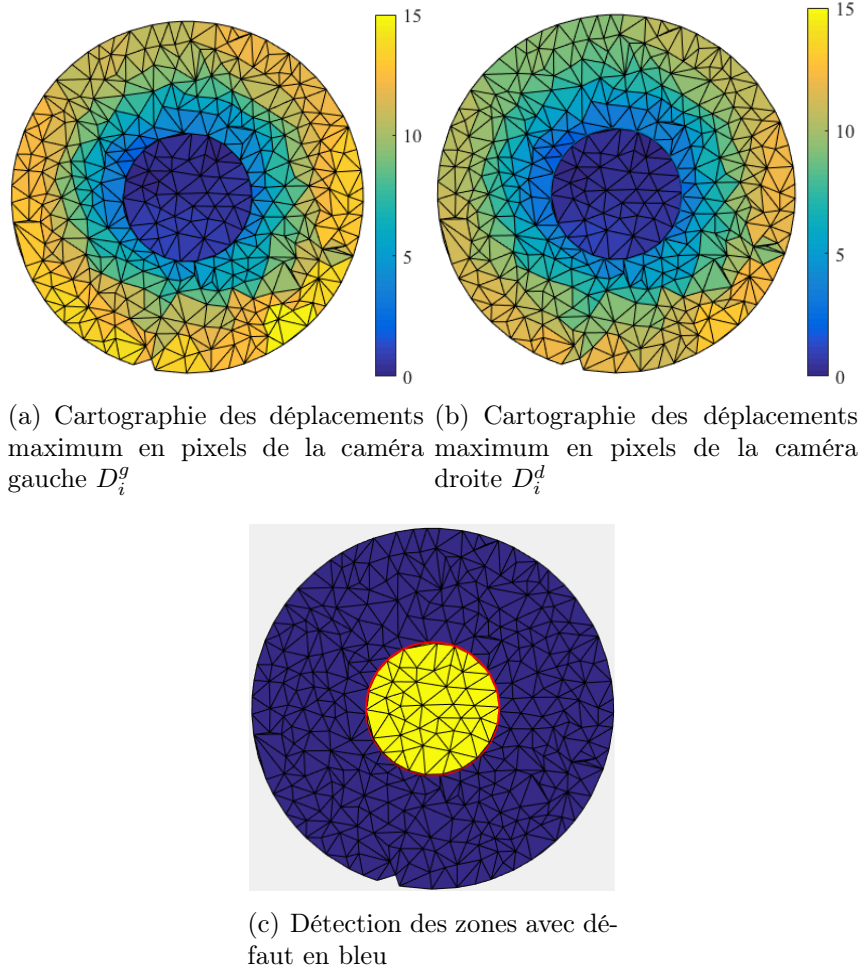


Figure 2.30 – Calcul des déplacements (pixels) et détection des défauts

4 Conclusion

Intégrer les opérations de mesure au sein des machines de production constitue la principale motivation des travaux présentés dans ce chapitre. Ce contexte de mesure particulier, appelé mesure *in-situ*, nécessite la maîtrise de l'efficacité de la mesure, c'est-à-dire du compromis entre le temps de mesure et la précision. Par rapport à ce besoin, les réponses apportées ont couvert trois domaines distincts.

Le premier concerne la modélisation des données nécessaires à la gestion des gammes de fabrication et de mesure. Ainsi, une modélisation SysML est proposée et permet de mettre en évidence les échanges de données à privilégier afin de mettre en place de façon efficace ce type de mesure. En effet, l'interopérabilité entre les données acquises et le modèle FAO est un élément important pour une bonne maîtrise de l'efficacité. Cette modélisation met aussi en évidence le besoin d'outil de pré-mesure pour la détection de

défaut.

Un deuxième aspect concerne la sélection, l'intégration et la qualification des capteurs dans cet environnement. En effet, le type de défauts à mesurer, la qualité géométrique du porteur, les conditions de mesure et en particulier l'éclairage sont des éléments pouvant affecter l'adéquation et la qualité des données acquises vis-à-vis de la surveillance du procédé d'usinage. Dans ce domaine, trois capteurs sans contact permettant une mesure à des échelles différentes ont été intégrés.

Enfin, un outil de pré mesure directement basé sur la description de la géométrie nominale issue de la FAO a été réalisé. Cet outil permet de détecter et de localiser très rapidement, les zones de non-conformité de la pièce usinée par rapport au modèle défini en FAO par une analyse par stéréocorrélation.

Chapitre 3

Stratégie de numérisation en contexte *in-situ*

Ce chapitre est consacré à la description des travaux réalisés sur l'amélioration des stratégies de numérisation en contexte *in-situ*. Après avoir positionné ces travaux dans le contexte plus général de la numérisation par moyen optique, les apports proposés pour la détermination d'un ensemble de points de vue réduits et l'adaptation à la numérisation sur MOCN 5 axes, sont explicités. Dans un second temps, une méthodologie de bouchage des trous de numérisation est détaillée. L'objectif poursuivi est d'aboutir à la définition de stratégie de numérisation dite minimale, et d'obtenir des données mesurées dans un format équivalent à la description du modèle théorique étudié. Enfin, un système de numérisation global permettant de délivrer un résultat directement dans le repère de définition de la pièce et ainsi de diminuer les temps de traitement est présenté.

Sommaire

1	Introduction	105
2	Stratégie de numérisation	106
2.1	Sur données numérisées [Audfray, 2009]	107
2.2	Sur modèle CAO	110
2.2.1	Approche par voxels [Zuquete Guarato, 2013, Lartigue et al., 2014]	110
2.2.2	Approche sur MOCN 5axes	114
3	Numérisation minimale et gestion des trous de numérisation	117
3.1	Mise en donnée	118
3.2	Définition de la matrice de raideur	119
3.3	Énergie de déformation	120
3.4	Détection des trous et calcul des déplacements	121
3.4.1	Application et Illustration	121
4	Numérisation globale : Mesure de forme par corrélation d'images [Dubreuil et al., 2016]	123
4.1	Mesure de la forme par déformation	124
4.2	Application à la détection des écarts géométriques	127
4.2.1	Mesure au capteur Laser Plan	128
4.2.2	Mesure par stéréo-corrélation sur maillage	129
5	Conclusion	131

1 Introduction

Dans le cadre de la mesure des pièces mécaniques, les méthodes optiques sont de plus en plus utilisées ; elles permettent en effet un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure. La complémentarité des différentes technologies des systèmes de mesure disponibles associée aux différentes contraintes liées au produit (échelle de défauts mesurés, complexité de la géométrie, matériaux mis en jeu, environnement de mesure) permettent d'augmenter le degré d'automatisation, la rapidité et la qualité de la numérisation. Néanmoins, malgré l'évolution des techniques de mesure sans contact et la simplification des systèmes de mesure associés, la définition d'une méthodologie de numérisation c'est-à-dire d'une stratégie de numérisation d'une pièce, reste un véritable enjeu. En effet, la gestion de la complétude de l'acquisition, des zones de recouvrement et de la qualité des données acquises sont encore des éléments mal maîtrisés ou tout au moins mal rationalisés.

Diverses contraintes sont généralement incluses dans la stratégie de numérisation. Il apparait à l'étude des travaux de la littérature que les contraintes de visibilité sont parmi les plus dominantes [Prieto et al., 1999, Zhao et al., 2012, Raffaella et al., 2013, Lorient et al., 2008]. En effet, la détermination des points de vue doit prendre en compte les problématiques des occultations possibles (figure 3.1) des différents constituants du capteur (source laser, projecteur, caméra(s)). Il est distingué alors la visibilité liée au capteur, de la visibilité liée à la géométrie de la pièce [Rémy, 2004, Lorient et al., 2008, Derigent et al., 2006]. Un autre aspect des contraintes à prendre en compte dans la stratégie de numérisation, concerne la qualité des données acquises (bruit de mesure, justesse), celle-ci est principalement liée à la distance de numérisation ainsi qu'à l'orientation du capteur par rapport à la surface numérisée [Mehdi-Souzani, 2006] mais dépend aussi d'autres facteurs comme le recouvrement entre différentes acquisitions.

La particularité de la numérisation en contexte *in-situ* (chapitre 2) impose des contraintes supplémentaires sur la stratégie de numérisation. En plus de la maîtrise de la qualité et de la complétude des données acquises, les temps de numérisation et de traitement de ces données deviennent des éléments déterminants. En effet, afin d'être intégrée au processus de fabrication (figure 2.1), l'opération de mesure ne doit pas pénaliser trop fortement le temps total de production. De plus, la prise de décision et l'application de solutions correctives doivent elles aussi être réalisées en un temps réduit

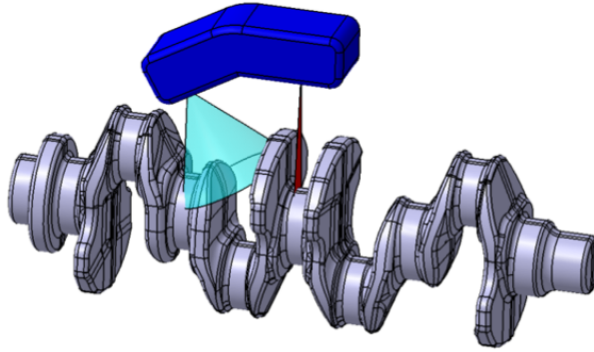


Figure 3.1 – Exemple d'occultation caméra [Zuquete Guarato, 2013]

nécessitant l'amélioration de l'intégration des résultats de mesure dans la chaîne numérique. Néanmoins, ce contexte de travail permet de profiter de la modélisation numérique de la pièce à étudier dans sa géométrie nominale ou sa géométrie simulée pour la phase étudiée.

Ainsi, les travaux présentés dans une première partie portent sur l'amélioration des stratégies de numérisation, par une réduction du nombre des configurations capteur utilisées ainsi qu'une maîtrise de la qualité. L'apport de la chaîne cinématique d'une MOCN 5 axes pour la génération de trajectoire de numérisation est ensuite détaillé. Une deuxième partie présentera les solutions proposées pour l'amélioration du traitement des résultats de mesure par l'apport d'une nouvelle méthode de mesure et de traitement des nuages de points.

2 Stratégie de numérisation

Les travaux réalisés portent en partie sur la définition de stratégie de numérisation. Cette stratégie doit permettre d'aboutir à un ensemble de configurations du capteur vis-à-vis de la pièce à numériser, et d'une trajectoire permettant de les relier. Plus précisément, ces ensembles de configurations peuvent être considérés comme un ensemble de points de vue P [Martins et al., 2005], définis par un point M et une orientation \vec{d} (figure 3.2). Un point de vue définit donc le positionnement (distance et orientation) relatif du capteur par rapport à la surface de la pièce. Cette approche permet la représentation d'un nombre important de capteurs différents et offre donc une grande généricité. Ainsi, une stratégie de numérisation est donc une méthodologie permettant d'aboutir à la détermination d'un ensemble de points de vue, en vue de la numérisation de la pièce. Cet

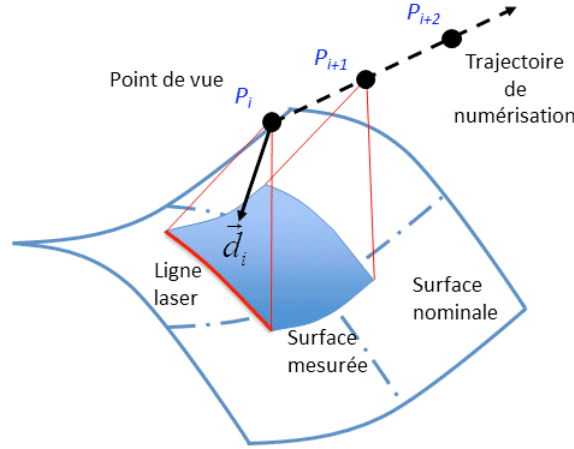


Figure 3.2 – Trajectoire de numérisation [Lartigue et al., 2014]

ensemble est suffisant dans le cadre de capteur ayant une fenêtre de visibilité volumique [Mehdi-Souzani et al., 2016]. Une planification des trajets entre les positions de cet ensemble, sous la forme d'une trajectoire de numérisation, peut être nécessaire dans le cas de capteur à fenêtre de mesure 2D ou 1D.

Cette partie présente donc les travaux réalisés sur l'élaboration de stratégie de numérisation. Appliqués tout d'abord pour des activités de rétro conception, ils ont évolué vers la définition de trajectoire de numérisation sur MOCN 5 axes.

2.1 Sur données numérisées [Audfray, 2009]

Une première approche de stratégie de numérisation est proposée dans le cadre des travaux de master de N. Audfray [Audfray, 2009]. La démarche proposée a pour but de déterminer le nombre minimal d'orientations nécessaires pour numériser un objet dont le modèle CAO est inconnu pour la numérisation sur MMT. Elle est basée sur une première numérisation manuelle permettant l'identification des orientations locales de la forme à mesurer à partir d'une voxelisation de ce premier nuage de point. Dans le cadre d'une numérisation sur MMT, uniquement les orientations positives selon l'axe Z de la machine étant numérisable, il est possible de simplifier les calculs et de ramener le problème 3D en 2D. En effet connaissant les coordonnées (n_x, n_y) des normales en chaque voxel, la coordonnée n_z peut être directement déterminée. Nous choisissons donc de représenter dans le plan (x, y) l'ensemble des normales de l'objet numérisé.

L'originalité de la méthode proposée porte sur la priorité donnée à la détermination

des orientations. Ainsi, plutôt que de raisonner du point de vue de la normale, nous raisonnons du point de vue de l'orientation capteur. En d'autres termes, nous ne cherchons pas à déterminer par quelles orientations un voxel est visible, mais nous cherchons, à partir d'une orientation donnée, les voxels ayant une orientation pouvant être numérisée. Cette approche est motivée principalement par le fait que le nombre d'orientations possibles du capteur est fini et relativement restreint (720 orientations dans le cas de l'utilisation d'une PH10). Cela permet donc d'obtenir un ensemble d'orientations effectivement utilisables pour la numérisation, en contraignant dès le départ le choix de celles-ci aux seules disponibles. Le deuxième intérêt de cette démarche concerne le temps de calcul, le nombre de voxels issus de la première numérisation peut rapidement être très important et supérieur au nombre d'orientations possibles. Il est donc plus simple d'associer des cônes de visibilité aux orientations capteurs qu'aux voxels.

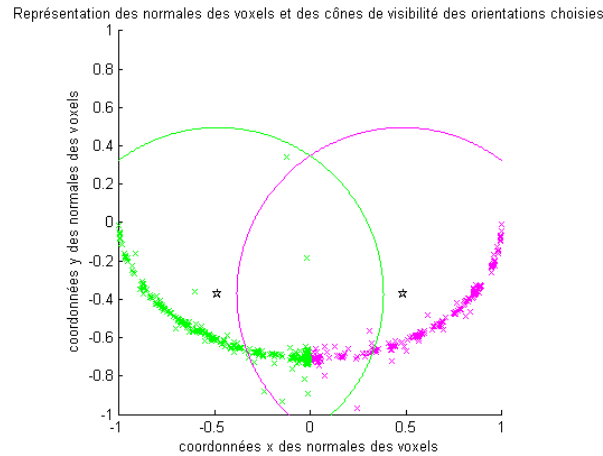


Figure 3.3 – Représentation des orientations [Audfray, 2009]

La méthode réalisée se résume donc de la façon suivante. Dans le plan (x, y) dans lequel la normale de chaque voxel peut être représentée par un point, il est possible de représenter le cône de visibilité du capteur pour une orientation choisie. Ce cône correspond à un cercle de rayon R , centré sur les coordonnées (x_c, y_c) correspondantes à l'orientation choisie, où $R = \cos\alpha$ et α est l'angle maximal de numérisation. Il est alors possible, sur le même graphique, de représenter l'ensemble des cônes de visibilité des orientations nécessaires (Figure 3.3). Afin de déterminer les orientations optimales en nombre minimal, un algorithme basé sur un principe de clusterisation a été proposé [Audfray, 2009]. Il consiste à partir d'un nombre initial d'orientations, de déplacer ces orientations afin de numériser l'ensemble des voxels (figure 3.4). Si aucune solution

permettant de numériser l'ensemble des voxels n'est trouvée, le nombre d'orientations est augmenté.

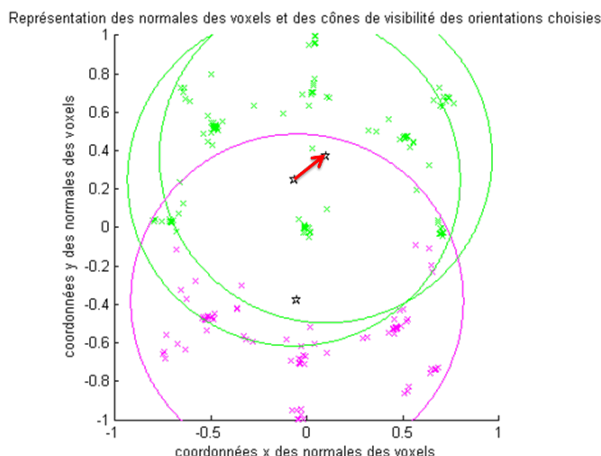


Figure 3.4 – Représentation de l'évolution des orientations [Audfray, 2009]

Cette première approche pour la définition de stratégie de numérisation de pièce de géométrie inconnue met en avant le parti pris dans mes travaux de rechercher des solutions minimisant le nombre de configurations capteur. En effet, cet aspect est nécessaire pour améliorer la qualité des données numérisées en réduisant ainsi les incertitudes liées au repositionnement du capteur [Bešić et al., 2011, Audfray, 2012]. Néanmoins, cette méthode basée sur une première numérisation n'utilise pas la connaissance de la géométrie nominale de la pièce étudiée. Or, dans le cadre de la mesure *in-situ* cette géométrie ou la géométrie simulée à la fin de la phase considérée est connue aux défauts d'usinage près. Nous présentons donc maintenant les approches basées sur la connaissance d'un modèle CAO.

2.2 Sur modèle CAO

Deux approches pour la génération de stratégie de numérisation sont présentées dans cette partie. Une première, basée sur une voxélisation du modèle numérique de la pièce, peut être adaptée à tout type de capteur et de porteur. La deuxième, plus présentée ici sous la forme de perspectives, est spécifique à la mesure *in-situ* sur MOCN 5 axes avec un capteur laser plan.

2.2.1 Approche par voxels [Zuquete Guarato, 2013, Lartigue et al., 2014]

La plupart des méthodes de planification de point de vue présentées dans la littérature sont généralement bien adaptées pour un capteur donné. La méthode proposée, *Voxel2Scan*, est quant à elle adaptée à tout type de capteur. L'approche adopte le point de vue du capteur à partir d'un nombre réduit de points de vue qui peuvent être définis en relation avec la fenêtre de mesure du capteur et les dimensions de la pièce. Cela conduit à la modélisation de la pièce par un ensemble de voxels de tailles correspondantes à la fenêtre de mesure (figure 3.5). L'analyse consiste donc à trouver des parties de la surface visibles par le point de vue du capteur. Un critère de qualité est également ajouté à la notion de visibilité en surface. Ces travaux font partie de la thèse de A. Zuquete. Cette thèse Cifre, avec la société Renault, a permis la mise au point de méthode de sélection de capteur et de numérisation pour l'équilibrage dynamique de vilebrequin par la mesure sans contact.

2.2.1.a Génération de la voxélisation initiale et étude de la visibilité

Une voxélisation initiale (figure 3.6) est réalisée en prenant en compte une dimension de voxel égale à la largeur optimale de la fenêtre de mesure du capteur (figure 3.5). Une normale \vec{n}_v est associée à chacun de ces voxels à partir de l'estimation de la moyenne des normales de la portion de surface incluse dans le voxel considéré. Cette estimation est calculée en utilisant une représentation tessellée de la surface. Ce vecteur normal, calculé initialement, sera ensuite utilisé pour décrire la surface incluse dans le voxel et analyser la visibilité. Il est nécessaire que ce vecteur soit représentatif de la surface. Pour cela, une analyse de cohérence de la normale doit donc être effectuée. En effet, la partie de surface peut présenter des variations brusques de courbure et d'orientation.

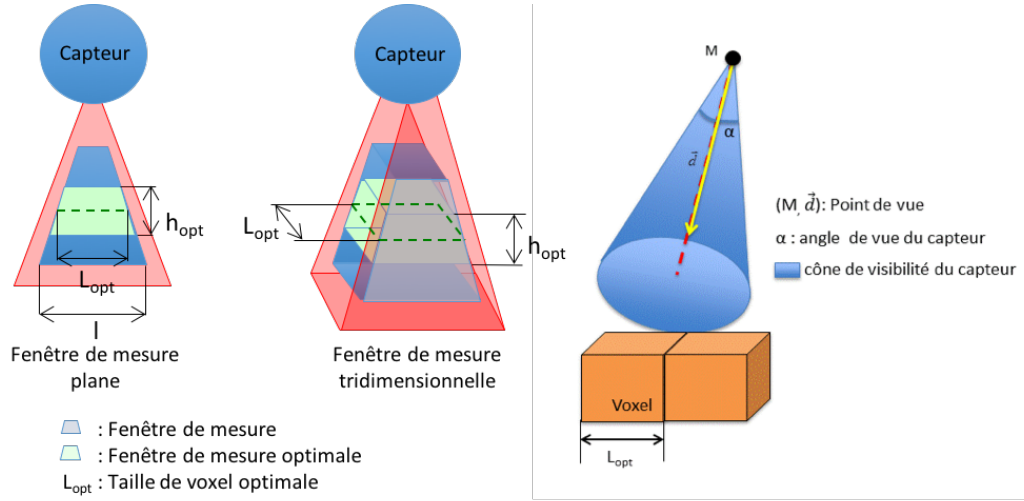


Figure 3.5 – Fenêtre de mesure optimale, plane (à gauche), et tridimensionnelle (au milieu) et modélisation du cône de visibilité du capteur. [Zuquete Guarato, 2013]

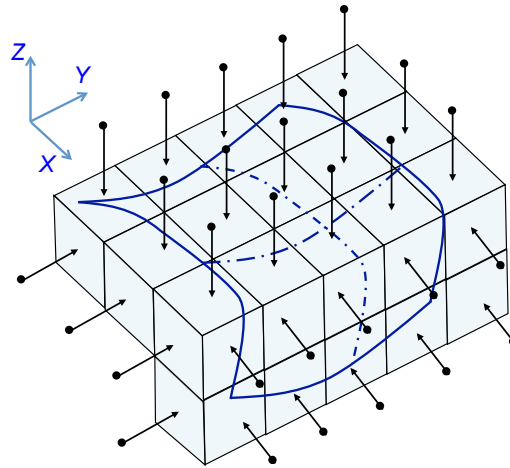


Figure 3.6 – Voxélisation initiale [Lartigue et al., 2014]

Ainsi, pour une normale locale \vec{n}_k incluse dans le voxel, l'angle θ_k entre cette normale locale et la normale moyenne \vec{n}_v peut être calculé par :

$$\theta_k = \arccos \frac{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_v}{\|\vec{n}_k\| \|\vec{n}_v\|} \quad (3.1)$$

Si cet angle θ_k est inférieur au quart de l'angle du cône de visibilité du capteur utilisé alors la portion de surface correspondante à \vec{n}_k pourra être numérisée avec une orientation \vec{n}_v . Si cette condition est vérifiée pour l'ensemble des normales locales incluses dans le voxel considéré alors la normale \vec{n}_v est bien représentative de la surface incluse dans celui-ci. Si cette condition n'est pas vérifiée, il est alors nécessaire de subdiviser le voxel et de recalculer des normales moyennes. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à

valider la cohérence du voxel ou que la taille de voxel devienne inférieure à la dimension du maillage utilisé pour représenter la surface.

2.2.1.b Qualification des voxels

Un voxel V est vu d'un point de vue $p = (M, \vec{d})$ s'il est le premier voxel intercepté par la droite passant par M et de vecteur directeur \vec{d} . Néanmoins, ce critère n'est pas suffisant pour qualifier la qualité des données numérisées avec ce point de vue. En effet, des travaux [Vukašinović et al., 2010, Mehdi-Souzani et al., 2016] ont montré la forte influence de l'angle de vue sur la qualité des points acquis. En effet, si l'angle entre la direction de la numérisation et le vecteur normal au voxel est supérieur à un seuil fixé α_{admin} , la qualité des points en termes de justesse ou de bruit de numérisation est dégradée. Une qualification des voxels vus à partir de critères de qualité est donc proposée. L'angle entre le vecteur normal du voxel \vec{n}_v et la direction du point de vue \vec{d} peut être défini par :

$$\phi = \arccos \frac{-\vec{d} \cdot \vec{n}_v}{\|\vec{d} \cdot \vec{n}_v\|} \quad (3.2)$$

Ainsi, en fonction d'une qualité attendue, un voxel peut être qualifié de la façon suivante (figure 3.7) :

- $0 \leq \phi \leq \alpha_{admin}/2$ le voxel est bien vu
- $\alpha_{admin}/2 \leq \phi \leq \alpha_{admin}$ le voxel est mal vu
- $\alpha_{admin} \leq \phi$ le voxel est non vu

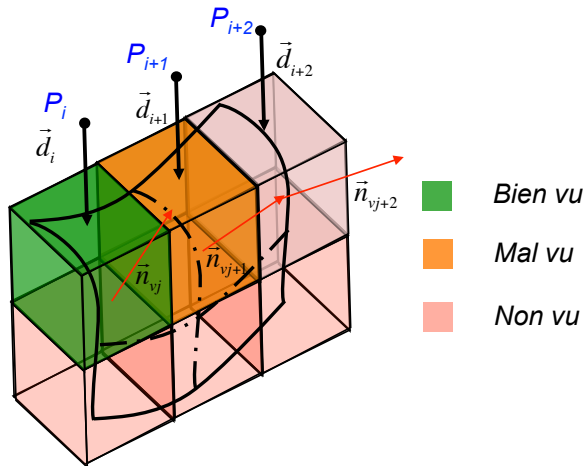


Figure 3.7 – Qualification des voxels [Lartigue et al., 2014]

2.2.1.c Algorithme proposé

L'algorithme proposé a pour objectif de définir un ensemble réduit de points de vue, permettant de numériser complètement la surface, avec une qualité de numérisation donnée. L'algorithme est initialisé en considérant un ensemble de points de vue dirigés selon les trois axes principaux du système de coordonnées. Des points de vue supplémentaires sont ajoutés si des zones ne sont pas numérisées avec la qualité souhaitée. L'algorithme se compose en cinq étapes principales :

- Voxélisation et définition d'un ensemble de points de vue initial,
- Analyse de la cohérence des normales,
- Qualification des voxels par rapport aux points de vue initiaux,
- Ajout de points de vue supplémentaires pour les voxels non vus,
- Détermination de l'ensemble final des points de vue.

2.2.1.d Application

La méthode présentée a été appliquée pour la détermination des points de vue nécessaire à la numérisation d'un vilebrequin. Les résultats obtenus (figure 3.8), pour deux technologies de capteurs différents, prouvent l'efficacité de l'algorithme.

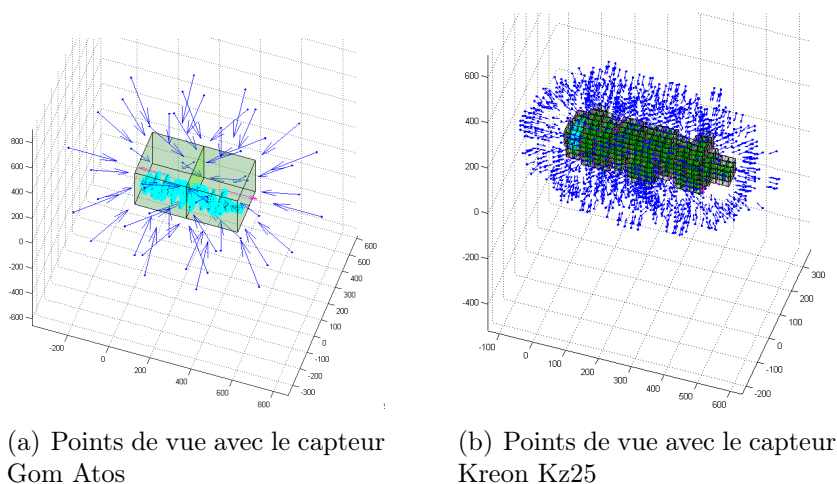


Figure 3.8 – Représentation des points de vue obtenus par la méthode *Voxel2Scan* sur un vilebrequin

Un des avantages de la méthode *Voxel2Scan*, est de fournir un ensemble réduit de points de vue capable de numériser la pièce. À partir de cet ensemble, il est possible de construire et/ou valider l'architecture du mécanisme permettant de réaliser au mieux la

trajectoire minimale parcourant les points de vue. La construction et/ou validation de cette architecture peut être menée par des logiciels de simulation de processus robotisés tels que Robcad[®] (figure 3.9)

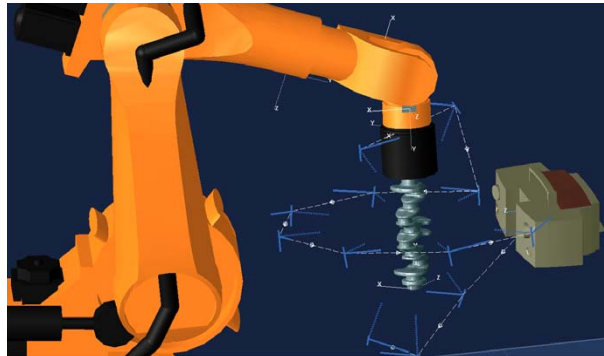


Figure 3.9 – Simulation de numérisation sous Robcad[®]

Ainsi, cette méthode, qui permet de déterminer un ensemble de points de vue, est basée sur la taille de la fenêtre de mesure du capteur. À partir d'un ensemble réduit de points de vue admissibles par rapport à la taille de la fenêtre de mesure et les dimensions de la pièce, l'algorithme vérifie la validité des points de vue en termes de visibilité et de qualité de numérisation. L'analyse de la visibilité repose sur la construction adaptative de voxels de la surface qui limite considérablement le temps de calcul. La méthode s'applique pour tout type de capteurs, mais une trajectoire de numérisation doit être ensuite définie en fonction du système de numérisation utilisé pour relier l'ensemble des points de vue. L'algorithme aboutissant à un ensemble limité d'orientations et de points de vue, il est bien adapté pour la numérisation à l'aide de porteurs permettant de réaliser des déplacements en 5 axes positionnés associés à un capteur à fenêtre volumique. Néanmoins, la définition d'un ensemble de points de vue, n'est pas un élément suffisant pour la définition complète d'une trajectoire lors de l'utilisation de capteurs à fenêtre plane. Une planification de trajectoires parcourant l'ensemble de ces points de vue est alors nécessaire. Cette problématique de génération de trajectoire est détaillée au paragraphe suivant.

2.2.2 Approche sur MOCN 5axes

Dans le cadre de la mesure *in-situ*, les travaux réalisés ont mis en évidence l'intérêt d'une gamme de mesure hiérarchisée (chapitre 2) relativement à l'échelle des défauts. Les macro-défauts (et/ou les défauts d'aspect) peuvent être très rapidement localisés à l'aide

d'un système de stéréovision à base de caméras directement implantées dans la machine-outil. La localisation des défauts sert alors de support pour la définition d'une trajectoire de mesure à incertitude maîtrisée. Les travaux de thèse de D. M. Phan, engagés en septembre 2015, ont pour objectif d'aboutir à la génération des trajectoires de mesure sur MOCN 5 axes. Dans ce cadre, le capteur est monté dans la broche de la machine comme un outil (figure 2.13). Les principales particularités concernent l'opportunité offerte :

- par le contrôle angulaire de la position de la broche en plus des deux axes de rotation disponible sur la machine,
- par le mouvement continu de ces deux axes rotatifs.

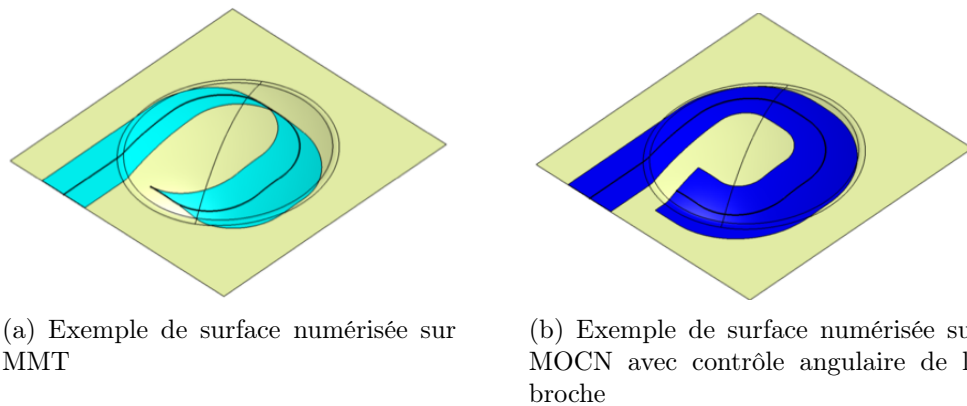


Figure 3.10 – Intégration d'un capteur laser plan dans une MOCN

En effet, par opposition aux méthodes appliquées sur les MMT disposant de deux axes positionnés au niveau de la tête de mesure, une fois l'orientation fixée en fonction de la qualité et de la visibilité, la trajectoire doit être nécessairement orthogonale au plan laser de façon à maximiser la taille de la trace laser sur la pièce. La trajectoire ainsi obtenue n'est pas nécessairement la plus pertinente. Le degré de liberté supplémentaire offert par le positionnement de la broche permet donc de dissocier la détermination de l'orientation du capteur par rapport à des critères de qualité de la génération de la trajectoire permettant la couverture de la pièce à numériser (figure 3.10).

Il s'agit donc lors de ces travaux de définir des algorithmes de génération de trajectoires de mesure intégrant les contraintes liées à la mesure *in-situ* et du capteur utilisé. La trajectoire sera optimale vis-à-vis de critères de qualité, mais minimale en termes de données acquises. Il est également nécessaire d'envisager un format de description de la trajectoire permettant d'intégrer l'orientation de la broche dans la machine.

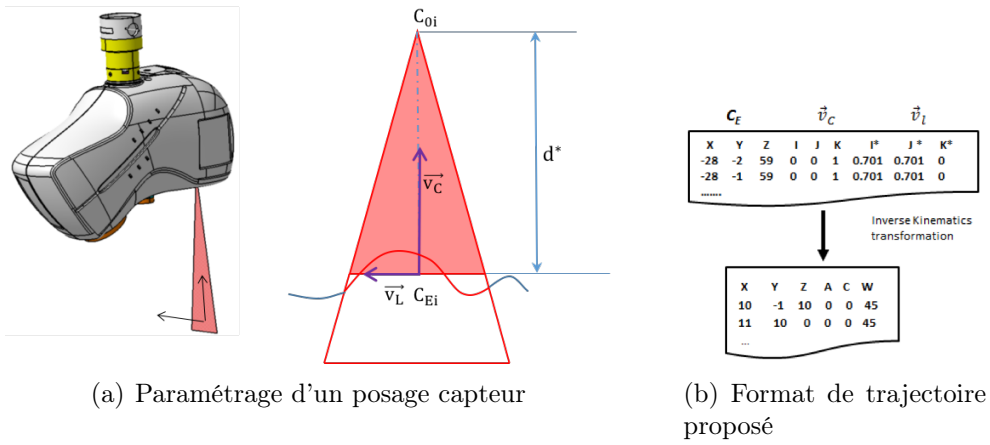


Figure 3.11 – Posage capteur et format de trajectoire

Les premiers travaux réalisés dans le cadre de cette thèse se sont concentrés sur la réalisation d'un simulateur de trajectoires de numérisation. Basé sur des critères de qualité (bruit, densité), ce simulateur permet de définir les zones de la pièce correctement numérisées [Phan et al., 2016]. Il est envisagé de s'appuyer sur cet outil pour développer un générateur de trajectoire de numérisation pour MOCN 5 axes.

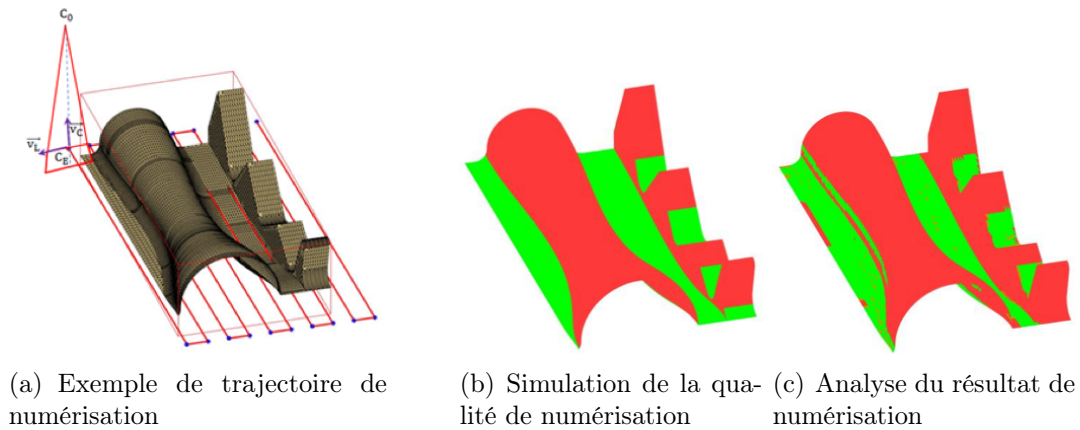


Figure 3.12 – Principe du simulateur de numérisation

3 Numérisation minimale et gestion des trous de numérisation

Les travaux présentés précédemment portent sur la définition de stratégie de numérisation pour assurer une complétude maximale du nuage de points obtenu. Or, il n'est pas toujours possible, en raison des problèmes d'accessibilité capteur/pièce, de numériser la totalité de la géométrie des surfaces constituant cette dernière. Il en résulte alors des lacunes de numérisation qui peuvent être pénalisantes pour l'exploitation du nuage de points. De plus, il est possible dans d'autres cas que cette complétude ne soit pas nécessaire. Il est alors envisageable de réduire le temps de numérisation. Ainsi, une réflexion est menée sur la complétude du nuage de points numérisés vis-à-vis de la représentativité de la forme. Le problème qui alors est posé est d'assurer une connaissance suffisante de la géométrie mesurée pour une application donnée.

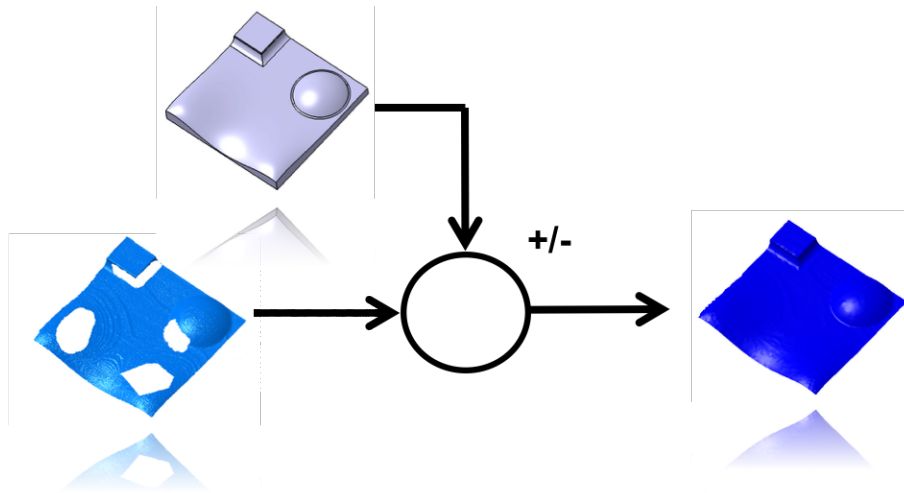


Figure 3.13 – Méthode proposée

Dans une première approche, afin d'assurer la complétude du nuage de points vis-à-vis de la forme nominale, nous proposons une méthode de remplissage des zones non numérisées, correspondant à des lacunes de numérisation [Quinsat and Lartigue, 2015]. De nombreuses méthodes de remplissage de trous existent plus ou moins dédiées à des géométries spécifiques [Wang and Y.-C., 2012]. Basée sur une connaissance a priori du modèle nominal (figure 3.13), cette méthode s'appuie sur des techniques de déformation par minimisation d'énergie. Elle a pour principal intérêt d'assurer un respect des formes

au travers de la gestion de la continuité des courbures.

3.1 Mise en donnée

La méthode de remplissage de trous s'appuie sur l'utilisation d'une approche mécanique. Ce type d'approche est basé sur une minimisation d'énergie et permet les résultats les plus pertinents [Zhou et al., 2010], [Choi and Szymczak, 2009], [Panchetti et al., 2010], [Pernot et al., 2006]. La représentation de la surface étudiée ou du nuage de points est réalisée sous la forme d'un maillage triangulaire. Ce maillage est assimilé à un treillis, chacune des arêtes du maillage étant considérée comme une poutre de section circulaire (figure 3.14). La déformation à appliquer est calculée en considérant la solution minimisant une énergie de déformation.

La plupart des travaux ne considèrent que des déformations de type traction ou compression, ne prenant en compte que les variations de longueur des arêtes du maillage. Les raccordements en courbures sont obtenus par l'ajout de contraintes. Nous proposons de travailler avec l'ensemble des déformations (traction, flexion, torsion) afin de préserver la forme initiale et l'évolution des courbures (tableau 3.1).

	DOF	Caracteristiques
Traction	u	$E.S$
Torsion	α	$G.I_o$
Flexion dans le plan (X,Y)	v et β	$E.I$
Flexion dans le plan (X,Z)	w et γ	$E.I$

Tableau 3.1 – Description des degrés de liberté (DOF)

Ainsi, à partir d'un maillage initial de la pièce, il est possible de définir un ensemble de m poutres $\{P^k\}_{[1,m]}$ et n nœuds $\{N_i\}_{[1,n]}$ définissant les extrémités des poutres. Le déplacement de chaque nœud est défini par six composantes, trois pour représenter les translations (u_i, v_i, w_i) et trois autres pour les rotations $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$. Ces déplacements sont exprimés dans un repère local \mathcal{R}^k différent du repère global \mathcal{R} . Les paramètres suivants peuvent être définis :

- U_i^k : Déplacement du nœud i dans le repère local lié à la poutre étudiée \mathcal{R}^k .

$$U_i^k = \begin{bmatrix} u_i^k & v_i^k & w_i^k & \alpha_i^k & \beta_i^k & \gamma_i^k \end{bmatrix}_{\mathcal{R}^k}^t. \quad (3.3)$$

- U_i : Déplacement du nœud i dans le repère global \mathcal{R} .

- $F_{(k,i)}^k$: Effort extérieur appliqué sur la poutre k au noeud i dans le repère local.
- $F_{(k,i)}$: Effort extérieur appliqué sur la poutre k au noeud i dans le repère global.

Chaque poutre k est supposée axisymétrique. Elle est définie par ses propriétés mécaniques (E^k, G^k) et ses caractéristiques géométriques (S_k, L_k, I_k, I_{O_k}) . Ainsi, la déformation du treillis étudié peut être complètement définie par l'ensemble des forces exercées, $F = \begin{bmatrix} F_1 & \dots & F_m \end{bmatrix}^t$ et les déplacements des nœuds $U = \begin{bmatrix} U_1 & \dots & U_m \end{bmatrix}^t$ exprimés dans le repère global \mathcal{R} .

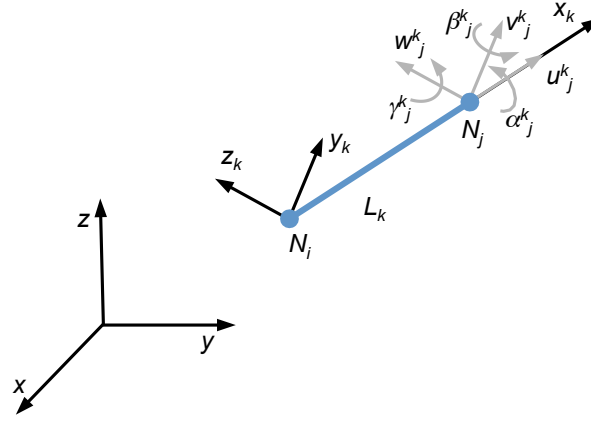


Figure 3.14 – Modélisation proposée pour les poutres

3.2 Définition de la matrice de raideur

Afin de simplifier les notations, nous introduisons une force généralisée sur la poutre k représentant les actions mécaniques exercées sur les deux nœuds extrémités correspondants $\hat{F}_k^k = \begin{bmatrix} F_{(k,i)}^k & F_{(k,j)}^k \end{bmatrix}^t$. De même, un déplacement généralisé $\hat{U}_k^k = \begin{bmatrix} U_i^k & U_j^k \end{bmatrix}^t$ sera utilisé. Ainsi, une matrice de rigidité locale pour une poutre k peut être définie par $\hat{F}_k^k = K_k^k \cdot \hat{U}_k^k$ avec :

$$K_k^k = \left[\begin{array}{c|c} A_k^k & C_k^k \\ \hline (C_k^k)^t & B_k^k \end{array} \right] \quad (3.4)$$

Où les sous matrices A_k^k , C_k^k , et B_k^k sont calculées à partir de la théorie des poutres Euler-Bernoulli et définies dans [Quinsat and Lartigue, 2015].

À partir, des angles d'Euler θ_k et ϕ_k (figure 3.15), le passage du repère local lié à la poutre \mathcal{R}^k au repère global peut être défini par la matrice de passage $M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} = R_y(\frac{\pi}{2} - \phi_k) \cdot R_z(\theta_k)$. Ainsi, les forces extérieures et les déplacements peuvent être facilement exprimés dans le repère global par $U_i = M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* \cdot U_i^k$ et $F_{(k,i)} = M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* \cdot F_i^k$ avec :

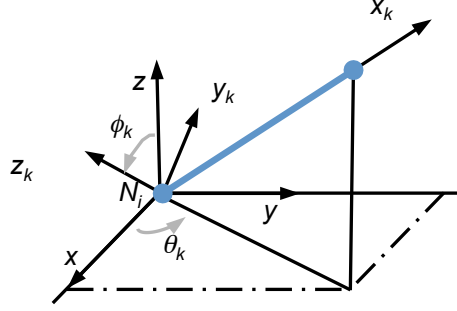


Figure 3.15 – Définition des repères

$$M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* = \left[\begin{array}{c|c} M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} & 0 \\ \hline 0 & M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} \end{array} \right] \quad (3.5)$$

Il est donc possible de définir la matrice de rigidité dans le repère global par la relation $\hat{F}_k = K_k \cdot \hat{U}_k$:

$$K_k = \left[\begin{array}{c|c} M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* & 0 \\ \hline 0 & M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* \end{array} \right] \cdot K_k^k \cdot \left[\begin{array}{c|c} (M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^*)^t & 0 \\ \hline 0 & (M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^*)^t \end{array} \right] \quad (3.6)$$

3.3 Énergie de déformation

Pour chaque poutre k l'énergie de déformation est définie par $E_k^{def} = \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_k^t \cdot K_k \cdot \hat{U}_k$. L'énergie totale de déformation pour l'ensemble du treillis peut donc être calculée de la façon suivante :

$$E_{tot}^{def} = \sum_{k \in [1, n]} \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_k^t \cdot K_k \cdot \hat{U}_k \quad (3.7)$$

La matrice de rigidité globale K est calculée par l'assemblage de l'ensemble des matrices de rigidité, et l'énergie de déformation totale devient :

$$E_{tot}^{def} = \frac{1}{2} \cdot U^t \cdot K \cdot U \quad (3.8)$$

La solution correspondant à la déformation du maillage est obtenue par une minimisation de cette énergie de déformation totale. En effet, dans le problème étudié, certains déplacements sont imposés, mais aucun effort. L'ensemble de forces extérieures est donc nul ainsi que le travail mécanique correspondant $W^{ext} = U^t \cdot F$, la minimisation de l'énergie totale est donc bien équivalente à la minimisation de l'énergie de déformation. La résolution de ce problème de la forme $X^t \cdot H \cdot X$ se résout aisément à l'aide des fonctions

d'optimisation de Matlab[®].

3.4 Détection des trous et calcul des déplacements

Avant de réaliser l'identification des trous dans le nuage de points numérisé, un recalage entre ce nuage et le maillage nominal est nécessaire. De nombreuses méthodes existent pour cela [Zhu et al., 2007, Wu et al., 2011, Chen et al., 2013], basées sur l'algorithme ICP [Besl and Kay., 1992].

À partir de ce recalage, il est recherché pour chacun des points N du maillage nominal les q points les plus proches dans le nuage de points numérisé. Un maillage local de ces q points est réalisé. L'intersection de ce maillage avec la droite passant par le point N et orienté par la normale locale est recherchée. Si elle n'existe pas, comme pour le point N_1 à la figure 3.16, alors le point N est considéré comme un point correspondant à un trou. Si l'intersection existe alors il est aisé d'en déduire le déplacement à imposer au nœud N pour le faire correspondre au nuage de points. La méthode de détection des trous mise en place réalise ainsi deux opérations :

- Elle identifie les zones du maillage nominal correspondant à des trous,
- Elle détermine les déplacements à imposer pour déplacer les nœuds des autres zones sur le nuage de points.

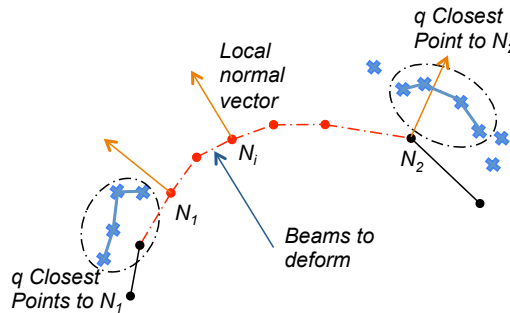


Figure 3.16 – Détection des trous et réduction du maillage étudié

3.4.1 Application et Illustration

Ainsi, à partir d'un nuage de points recalé sur un maillage nominal, la procédure précédente permet de déterminer les déplacements à imposer pour les nœuds correspondant aux zones correctement numérisées. Les déplacements correspondants aux zones de trous sont, quant à eux, calculés à partir de la minimisation de l'énergie de déformation

$$E_{tot}^{def} = \frac{1}{2} \cdot U^t \cdot K \cdot U.$$

Une illustration de la méthode de déformation pour le remplissage de trous de numérisation est présentée à la figure 3.17. Lorsque le nombre de nœuds à étudier est plus grand, il est alors nécessaire de découper le problème d’optimisation en différents sous-problèmes, pour chacune des zones correspondantes à des trous, afin de limiter le nombre de données à gérer. Il faut alors étudier la frontière de chacune de ces zones afin de maintenir un raccordement en courbure.

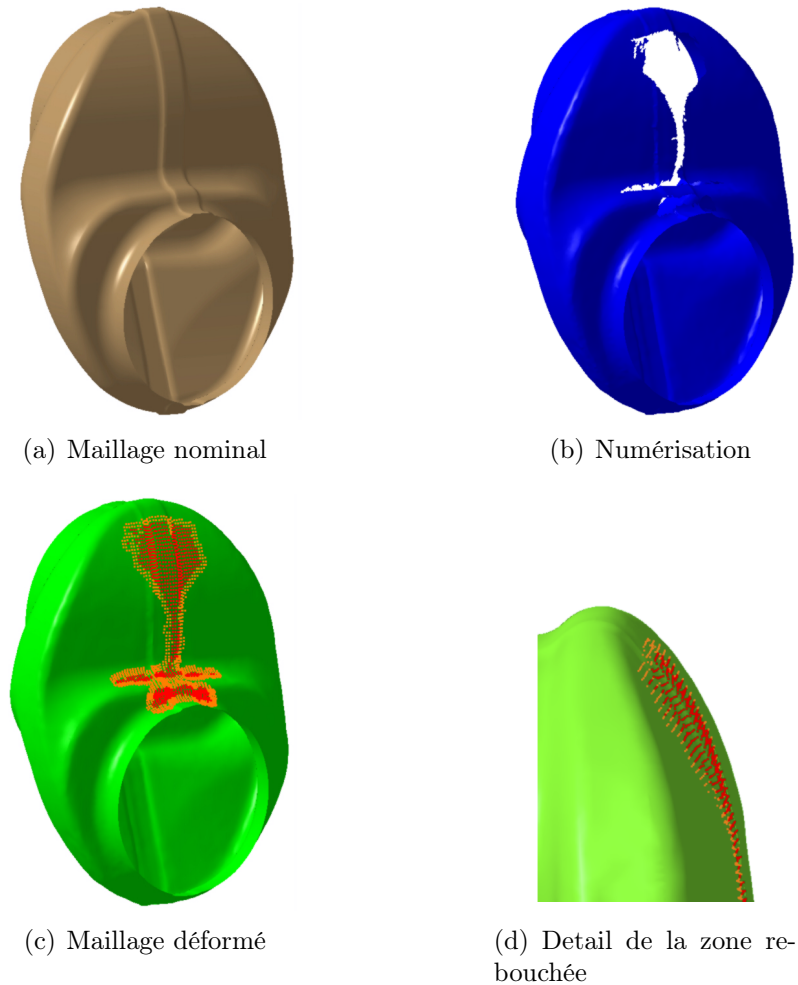


Figure 3.17 – Exemple de la méthode de déformation

Finalement, la méthode présentée permet d’obtenir une représentation de la pièce numérisée sous la forme d’un maillage. Ce maillage est de même structure que le maillage nominal et ne comporte aucun trou. Dans les zones correctement numérisées, les nœuds du maillage, de par les déplacements imposés, ont un écart minimisé avec le nuage de points. Dans les zones de trou de numérisation, la forme de la pièce correspond à une déformation (minimale en termes d’énergie) de la pièce nominale par la propagation

des déplacements imposés. Nous avons aussi appliqué cette approche afin de calculer les balourds d'un vilebrequin à partir de données discrètes selon la méthode développée par A. Zuquete dans ces travaux de thèse ([Zuquete Guarato, 2013]). Les résultats obtenus montrent que l'erreur finale sur la détermination des balourds est plus faible avec les données issues de notre approche comparée aux données issues d'un rebouchage réalisé à l'aide d'un logiciel de CAO.

Cette procédure permettrait donc d'intégrer plus facilement les résultats de mesure dans la maquette numérique. En effet, une numérisation même partielle de la pièce peut être utilisée pour *mettre à jour* cette dernière, de par le fait que le modèle obtenu est de même nature. Il peut donc être envisagé de proposer des stratégies de numérisation minimales et réduire ainsi le temps de mesure. Une difficulté majeure réside dans l'opération de recalage. En plus d'un temps de calcul pouvant être préjudiciable, cette opération induit nécessairement un décalage provenant en partie du fait que la géométrie réelle de la pièce ne correspond pas à celle utilisée pour le positionnement du nuage de points. L'importance d'obtenir des résultats de mesure directement liés au repère de définition de la pièce est un élément déjà explicité au chapitre 2 et illustré ici une nouvelle fois. Cette problématique est en partie à l'origine des travaux présentés dans cette dernière partie.

4 Numérisation globale : Mesure de forme par corrélation d'images [Dubreuil et al., 2016]

Une des limites majeures à l'utilisation des moyens optiques pour la mesure de géométrie concerne les difficultés liées au post-traitement nécessaire sur les données issues de la numérisation. En effet, les données acquises par moyens optiques sont souvent hétérogènes, bruitées, et peuvent comporter des lacunes en fonction de la complexité de la géométrie à numériser. Ainsi, les analyses des mesures réalisées peuvent devenir complexes et l'identification des défauts présents sur la pièce, une réelle difficulté. Des travaux précédents ont permis de mettre en place des outils de sélection des moyens de mesure en fonction de l'échelle du défaut à mesurer [Dubreuil et al., 2014, Mehdi-Souzani et al., 2016]. Bien que cette démarche garantisse l'adéquation entre la qualité des données acquises et l'identification du défaut recherché, le traitement de ces données reste une étape relativement longue. Or, cet élément est très pénalisant dans le contexte

de la mesure *in-situ*. Il est donc nécessaire d'améliorer l'interopérabilité entre la mesure et la FAO.

Une première approche a été proposée pour la gestion des trous de numérisation, délivrant des résultats dans un format directement compatible avec la modélisation de la pièce en FAO. Il est maintenant proposé de réduire le temps de traitement, et ainsi améliorer la mise en place d'actions correctives par la mise au point d'une méthode de mesure originale basée sur de la stéréo-corrélation d'images. En effet, en parallèle des études permettant de proposer une stratégie de numérisation à qualité définie, une autre partie des travaux entrepris portent sur la proposition de nouveaux systèmes de mesure par vision. Ils sont issus du stage de Master 2 de L. Dubreuil [Dubreuil, 2013] et de ses premiers travaux de thèse [Dubreuil et al., 2014].

Dans le cadre de l'étude présentée, la méthode de calibration choisie est différente de celle présentée au paragraphe 3.3.1 du chapitre 2, elle consiste à utiliser la pièce observée comme cible d'étalonnage. Par conséquent, aucun objet d'étalonnage n'est nécessaire [Faugeras et al., 1992]. Cet auto-étalonnage vise à trouver les paramètres intrinsèques et extrinsèques du système de stéréo-vision directement à partir des images de l'objet lui-même.

4.1 Mesure de la forme par déformation

Pour effectuer la mesure, la description mathématique de la surface analysée est nécessaire. Cette modélisation de la surface peut être basée sur des facettes obtenues par exemple par une triangulation de Delaunay, mais peut également être réalisée par des modèles NURBS [Beaubier et al., 2014]. Dans ce qui suit, une description sous forme de maillage triangulaire (T3) est utilisée. Il est à noter que d'autres types d'éléments (par exemple, des quadrilatères à 4 nœuds [Dufour et al., 2015]) peuvent également être considérés. Un des avantages de cette description est qu'elle fournit des liens directs et continus avec des simulations par éléments finis [Sutton and Hild, 2015]. La mesure est basée sur une approche par corrélation d'images globale. Le principe de minimisation sous-jacent est basé sur la conservation du niveau de gris des images f^l , f^r prises par les caméras gauche et droite, c'est-à-dire pour deux points x^l et x^r dans les deux images :

$$f^l(x^l) = f^g(x^g) \quad (3.9)$$

Le principe de mesure consiste à déformer le maillage T3 nominal de façon à le faire correspondre à la pièce réelle c'est-à-dire à minimiser le résidu de corrélation. Cette déformation est réalisée par le déplacement des nœuds du maillage. Dans ce cas, les maillages initial et déformé ont exactement la même structure. Par conséquent, les coordonnées des nœuds sont les inconnues de la procédure de corrélation. Ainsi, les coordonnées x^l et x^r dans les caméras droite et gauche sont écrites, en tant que fonction des coordonnées du nœud \mathbf{N}_i du maillage pour chaque point d'évaluation \mathbf{X} situé sur le maillage (figure 3.18).

$$x^l = x^l(\mathbf{X}, N_i) \quad , \quad x^r = x^r(\mathbf{X}, N_i) \quad (3.10)$$

La position des nœuds est déterminée par une minimisation globale sur la région d'intérêt (ROI) par rapport aux inconnues de position des nœuds ν_i .

$$\mathbf{N}_i = \arg \min_{\nu_i} \sum_{ROI} (f^l(x^l(\mathbf{X}, \nu_i)) - f^r(x^r(\mathbf{X}, \nu_i)))^2 \quad (3.11)$$

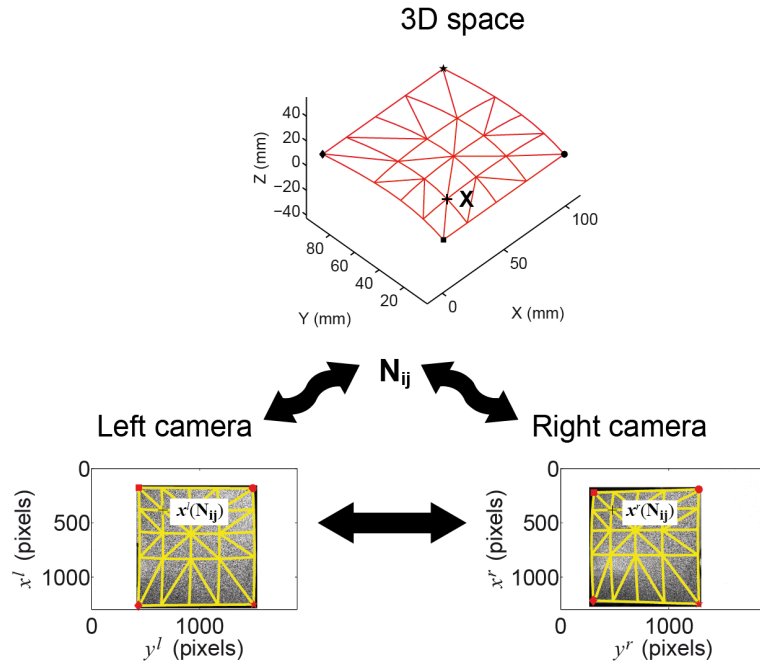


Figure 3.18 – Mesure de la forme 3D à partir de la représentation tessellée de la pièce

Dans ce cas, la position initiale des nœuds est celle correspondante au maillage nominal étant donné que la calibration est réalisée par rapport au repère de la CAO. Ce principe de mesure permet donc d'obtenir une représentation de la géométrie de la pièce réelle directement dans le repère CAO, le tout avec une structure correspondante avec celle de la pièce nominale. Néanmoins, le nombre de degrés de liberté élevé de ce problème d'optimisation (3 inconnues par nœud) peut être préjudiciable. En effet,

la dimension et le temps de résolution de ce problème d'optimisation peuvent être très élevés et de par le nombre élevé de degrés de liberté il est possible d'obtenir un repliement du maillage.

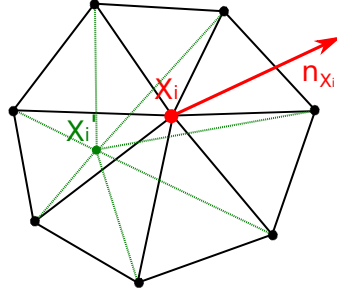


Figure 3.19 – Principe du déplacement des nœuds selon la normale locale

Une idée originale consiste à déplacer les nœuds du maillage uniquement selon la normale locale au nœud analysé (figure 3.19). Nous considérons que cette dernière n'évoque pas au cours de la déformation et reste constante. Par rapport à un déplacement quelconque (figure 3.20), cette régularisation permet d'obtenir un maillage de structure identique au maillage initial et de diviser par trois le nombre de degrés de liberté à étudier.

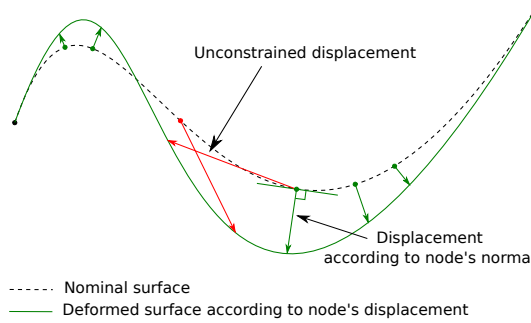


Figure 3.20 – Comparaison des modes de déplacements possibles

Le problème défini à l'équation 3.11 a donc pour inconnues les coordonnées des nœuds selon la normale locale. Afin de réaliser correctement l'optimisation, il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de points d'évaluation $\mathbf{X}_{\mathbf{P}_i}$. Il a ainsi été choisi de définir ces points sur l'ensemble des facettes de façon identique à des points d'intégration dans un problème de calcul éléments finis [Zienkiewicz and Taylor, 1989]. Compte tenu des variations importantes du gradient des images, une distribution uniforme de ces points d'évaluation sur chacune des facettes est définie. Un exemple de cette discrétisation est proposé à la figure 3.21 pour 6×6 points d'évaluation. À partir de cette définition, leurs positions respectives dans les caméras gauche et droite sont données par les relations de

projection. Les niveaux de gris et les gradients locaux sont obtenus par une interpolation bilinéaire des pixels au voisinage des points considérés.

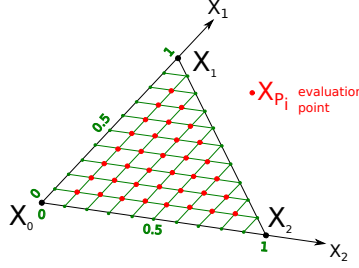


Figure 3.21 – Discretisation d'une facette selon 36 points d'évaluation

$$\tau_{lin} = \sum_{ROI} (f^l(\mathbf{x}^l) + [\mathbf{G}^l](\mathbf{x}^l) - f^r(\mathbf{x}^r) - [\mathbf{G}^r](\mathbf{x}^r))^2 \quad (3.12)$$

avec

$$G^l(\mathbf{x}^l) = (\nabla f^l \cdot \delta \mathbf{x}^l)(\mathbf{x}^l) \quad , \quad G^r(\mathbf{x}^r) = (\nabla f^r \cdot \delta \mathbf{x}^r)(\mathbf{x}^r) \quad (3.13)$$

En considérant \mathbf{X}_p les points d'évaluation, \mathbf{X} les nœuds du maillage et \mathbf{X}_n les déplacements selon la normale, il est possible de calculer :

$$\delta x^{l,r} = \frac{\partial x^{l,r}}{\partial \mathbf{X}_p} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}_p}{\partial \mathbf{X}} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}_n} \cdot dX_n \quad (3.14)$$

Ainsi, l'équation 3.11 peut être résolue par une méthode de Newton-Raphson. Les nœuds étant déplacés à chacune des itérations

4.2 Application à la détection des écarts géométriques

Pour illustrer la pertinence de la méthode proposée pour la mesure de défaut d'usinage, une pièce test est analysée. Deux différents systèmes de mesure sont utilisés pour évaluer les écarts induits par usinage. Le premier est un système de mesure composé d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) équipé d'un capteur laser-plan (Kreon) monté sur une tête Ph10. La seconde technique est la stéréo-corrélation sur maillage précédemment présentée.

Les écarts géométriques étudiés correspondent à ceux obtenus durant l'usinage de pièce de formes complexes comme les hauteurs de crêtes, les facettisations, les raccords entre les différentes stratégies. Le modèle CAO de la pièce étudiée est représenté à la figure 3.22. Elle comporte les trois éléments précédemment cités et a été usinée selon une stratégie de plans parallèles. La facettisation est directement définie dans la CAO,

les défauts de raccordement et de hauteur de crêtes sont produits lors de l'usinage.

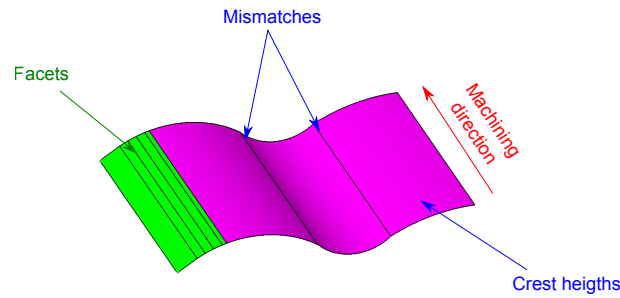


Figure 3.22 – Modèle CAO de la pièce étudiée

4.2.1 Mesure au capteur Laser Plan

Une première mesure est réalisée à l'aide d'un capteur laser plan (Kreon KZ25). Cette numérisation est obtenue avec une orientation unique du capteur, de façon à supprimer les erreurs présentes dans les zones de recouvrement, lorsque différentes orientations sont utilisées [Bešić et al., 2011, Audfray, 2012]. Un recalage des données sur le modèle CAO est ensuite nécessaire pour analyser les déviations. Cette étape n'est pas nécessaire pour la mesure par stéréo-corrélation de par la procédure de calibration employée. Les résultats représentés sur la figure 3.23 illustrent les déviations entre le nuage de points et le modèle CAO. L'écart type des écarts et la déviation moyenne sont respectivement de $79 \mu m$ et $22 \mu m$.

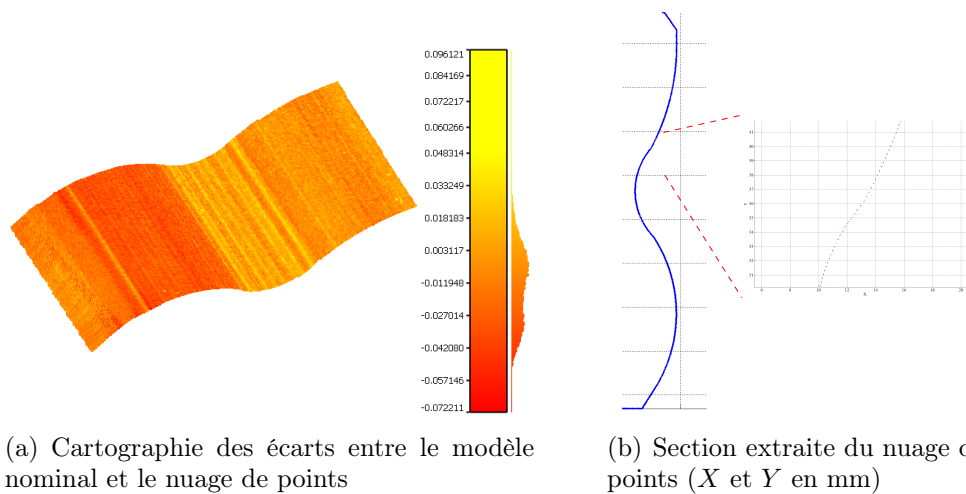


Figure 3.23 – Représentation des résultats obtenus par mesure au capteur laser plan

Afin d'illustrer les défauts mesurés, une section orthogonale à la direction d'usinage est extraite. Les défauts de raccords sont les seuls facilement identifiables contrairement aux hauteurs de crêtes et à la facettisation. Ceci est principalement dû au bruit de numérisation.

4.2.2 Mesure par stéréo-corrélation sur maillage

La pièce étudiée est maintenant mesurée à l'aide de la méthode présentée au paragraphe 4.1. Pour réaliser la stéréo-corrélation sur maillage, deux photos sont prises. La figure 3.24 montre le motif aléatoire, obtenu par le dépôt de spray de peintures noire et blanche. Ce mouchetis nécessaire à la corrélation d'image a été appliqué après la mesure précédente.

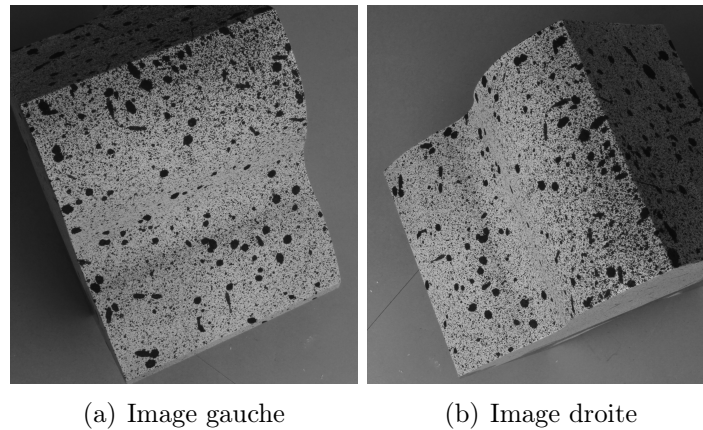


Figure 3.24 – Photographie de la pièce mesurée

La calibration du système stéréoscopique est réalisée à l'aide de la surface tessellée. Le maillage est directement réalisé à partir du modèle nominal grâce aux outils CAO. Avant de réaliser la mesure, une analyse de visibilité est réalisée pour enlever les mailles qui ne peuvent être vues par les deux caméras [Katz et al., 2007]. Le résidu de stéréo-corrélation à l'issue de l'étape de calibration est représenté sur la figure 3.25(a). Les zones présentant une valeur élevée de résidu correspondent aux parties correspondant aux plus grandes déviations lors de la mesure au capteur laser plan. Après optimisation le résidu est plus faible dans ces zones (figure 3.25(b)). Il existe toujours des zones avec un fort résidu indiquant que la forme obtenue ne correspond toujours pas à la forme exacte de la pièce.

Le déplacement mesuré des nœuds est représenté sur la figure 3.26. Une déviation moyenne de $8.3 \mu m$ et un écart type de $8.8 \mu m$ sont obtenus. Sur le côté gauche, deux

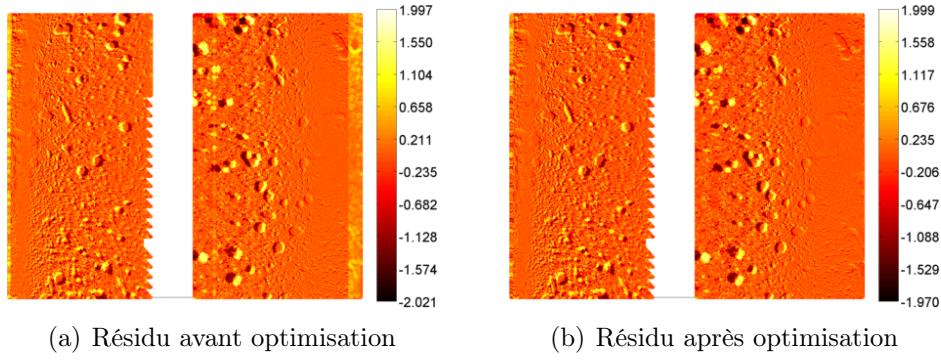


Figure 3.25 – Représentation des résidus de stéréo-corrélation

bandes verticales apparaissent, illustrant la présence du défaut correspondant aux facettes, alors que le nuage de points obtenu avec le capteur laser-plan ne permettait pas cette identification. Sur la droite de l'image, les deux autres bandes verticales montrent que la section cylindrique a subi globalement un mouvement horizontal illustrant le défaut de raccord. Cependant, de nombreux nœuds ont des déplacements très différents par rapport à leur voisinage. Ceci est en partie dû à la taille inadaptée du mouchetis sur la surface mesurée. Ces nœuds sont considérés comme des valeurs aberrantes. Les hauteurs de crêtes quant à elles ne peuvent être mesurées en raison de la taille de maille utilisée. Il faudrait envisager une mesure avec un maillage beaucoup plus fin, différent de celui utilisé pour la calibration. L'utilisation d'un mouchetis projeté permettrait de réaliser une étude multi-échelles avec un maillage adaptatif.

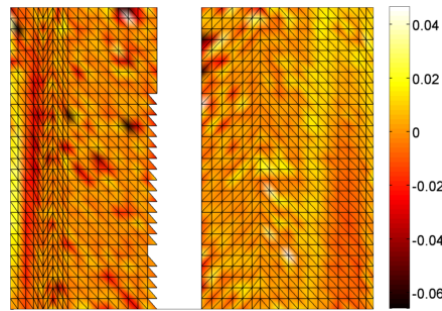


Figure 3.26 – Déplacement mesuré en chacun des nœuds (mm)

Ainsi, une méthode originale de mesure par stéréo-corrélation a été proposée. Basée sur la description de la surface par un maillage, elle permet d'obtenir un résultat correspondant directement à une carte de déviation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle. Comparée aux méthodes existantes s'appuyant sur la description de la surface par un modèle Nurbs, basée sur une représentation tessellée, elle permet d'envisager la mesure de défauts de géométrie complexe tels que les défauts de raccord. Une

première étude a permis de montrer la pertinence de cette méthode pour la mesure de défaut sur une pièce test. La limite majeure de cette approche concerne le grand nombre de degrés de liberté à traiter limitant ainsi le nombre de nœuds. Il est néanmoins possible d'envisager une analyse multi-échelles en utilisant différentes tailles de maille ainsi que différentes images (plus ou moins agrandies) de la pièce. L'une des difficultés est de gérer les changements de calibration inhérents aux variations de focales.

5 Conclusion

Le contexte de la mesure *in-situ* impose l'amélioration de l'efficacité de la mesure de façon à ne pas pénaliser le temps total de production. Les travaux présentés dans ce chapitre sont axés sur l'utilisation de capteurs sans contact et apportent une amélioration de cette efficacité selon trois axes.

Le premier apport concerne les stratégies de numérisation. Une méthodologie pour établir l'ensemble des points de vue nécessaire à une numérisation est ainsi proposée et la réalisation de trajectoires de numérisation sur MOCN 5 axes est en cours de réalisation.

Le deuxième apport est axés sur le pré-traitement et la complétude des données acquises. Les travaux ont permis d'aboutir à la mise au point d'un outil de bouchage de trous de numérisation permettant de délivrer un résultat de mesure de structure identique au modèle nominal. L'objectif à terme est d'étudier, avec cet outil, la quantité minimale d'informations requises pour le suivi de production.

Enfin, le dernier point d'amélioration concerne la mise au point de système de mesure délivrant une information directement compatible avec le modèle numérique de la pièce. Ce modèle pouvant être le modèle simulé pour la phase d'usinage considéré. Cette intégration permet une réduction des temps de traitement des mesures, mais doit encore être validée par des études dans la machine-outil.

Néanmoins, ces trois axes de travail doivent être complétés par une approche multi-capteurs. En effet, la gestion de technologie de capteur et de données hétérogènes est un élément important qui est pour le moment peu traité.

Chapitre **4**

Perspectives de recherche

Ce dernier chapitre est consacré à la description des perspectives de recherche ayant pour fondement les travaux exposés précédemment. Il se décompose en trois parties. La première partie est motivée par une évolution des moyens de mesure et des procédés de fabrication. Elle porte ainsi sur l'analyse de la topographie des surfaces internes mesurées par tomographie.

La seconde partie concerne la proposition d'un système de mesure délivrant non plus une information dimensionnelle, mais directement le défaut mesuré à partir d'une base prédéfinie. Une première approche sur base modale est présentée.

Enfin, dans une troisième partie, des perspectives à plus long terme sont proposées. Elles sont centrées sur l'amélioration de l'interopérabilité entre les résultats de mesure et la maquette numérique définie en FAO. Il s'agit plus particulièrement de proposer des méthodologies permettant de faire évoluer à la fois le processus de fabrication et la géométrie modélisés dans le modèle FAO.

Sommaire

1	Introduction	135
2	Analyse des topographies de surface obtenues en fabrication additive	136
2.1	État de l'art	137
2.2	Traitement des données	138
2.3	Une première approche : Étude de l'aire relative interne et variation de l'échelle	140
2.3.1	Mesure de l'aire relative interne	140
2.3.2	Évolution de l'échelle	142
2.3.3	Premiers résultats	143
3	Amélioration du temps traitement des données	147
4	Suivi de la maquette numérique : fusion de données et modification du processus	149
4.1	Intégration des données acquises à la maquette numérique	150
4.2	Intégration des corrections à la maquette numérique	150
5	Conclusion	151

1 Introduction

Les travaux présentés au chapitre 1 portent sur l'étude des topographies de surface obtenues lors d'opération de fraisage de pièce de formes complexes. Ces topographies sont des mesures en trois dimensions de la surface externe de la pièce. L'évolution des moyens de production, comme la fabrication additive, et des moyens de mesure, comme la tomographie, nourrit mon intérêt pour l'analyse de formes internes à partir de données en quatre dimensions (position dans l'espace et densité) (figure 4.1). C'est-à-dire d'envisager le passage d'une analyse de topographie surfacique à une topographie volumique.

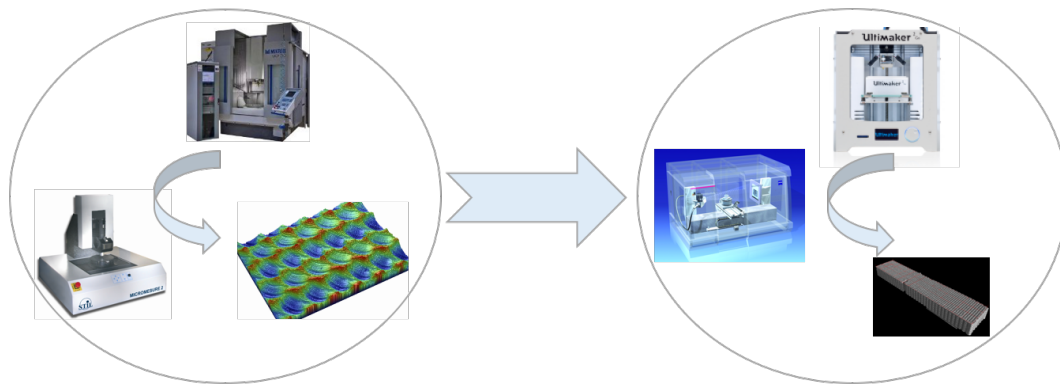


Figure 4.1 – Évolutions des travaux sur l'analyse des surfaces produites

Un deuxième axe de développement présenté concerne l'amélioration de la mesure et la détection de défaut par stéréo-corrélation d'images. Cet axe relève d'un souci de simplification du traitement de données par une mesure ne délivrant pas seulement des points 3D, mais directement l'influence de certains défauts, à partir d'une base de défauts préalablement construite. Ceci permettrait une prise de décision rapide quant à la qualité de la pièce produite et la réalisation d'opérations correctives si nécessaire.

Enfin, un dernier point correspondant à un horizon plus lointain est présenté. Il s'agit finalement d'un objectif global des travaux que je mène sur la mesure *in-situ*. Il concerne les interactions entre le modèle FAO et la pièce produite, et plus particulièrement sur la possibilité de maintenir à jour la maquette numérique de la pièce à partir des mesures et corriger automatiquement les trajectoires d'usinage.

2 Analyse des topographies de surface obtenues en fabrication additive

Dans le cadre de la fabrication additive, les divers procédés employés permettent la réalisation de pièces de géométries complexes et optimisées en vue d'apporter un allègement de masse pour une sollicitation donnée. Ainsi, il est possible de réaliser des pièces volontairement poreuses ou comportant des structures internes (figure 4.2) afin d'en diminuer la masse en contrôlant la définition du modèle numérique ou la stratégie de remplissage. Les caractéristiques mécaniques du produit ainsi réalisé dépendent fortement de ces structures.



Figure 4.2 – Exemple de structure interne

De premiers essais ont été réalisés en collaboration avec L. Hattali du FAST-Univ. Paris Sud sur des éprouvettes de flexion pour l'étude de la fissuration. Ces éprouvettes sont fabriquées par un procédé de dépôt de fil (**F**used **F**ilament **F**abrication - **FFF**) en faisant varier différents paramètres de remplissage (épaisseur des couches, orientation du sens de dépôt, densité). Elles comportent une entaille directement issue de la fabrication (figure 4.3(a)). Après avoir amorcé la fissuration, un essai de flexion trois points est réalisé afin d'évaluer le facteur d'intensité de contrainte correspondant à la propagation brutale de fissures K_c . Les résultats présentés au tableau 4.1 illustrent bien la forte influence des paramètres liés au pilotage du procédé sur les caractéristiques mécaniques, de la pièce réalisée. Il devient alors nécessaire de définir les relations possibles entre les stratégies de remplissage et la résistance du matériau réalisé. Pour établir ces relations, nous proposons une première approche permettant de caractériser la topographie des surfaces produites en fabrication additive. Comme décrit au chapitre 1, la topographie de surface est considérée comme un élément pivot entre le procédé et la fonction à réaliser.

Essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_c (MPa \cdot \sqrt{m})$	0.54	1.27	1.68	0.99	2.03	0.78	0.55	0.68	0.61

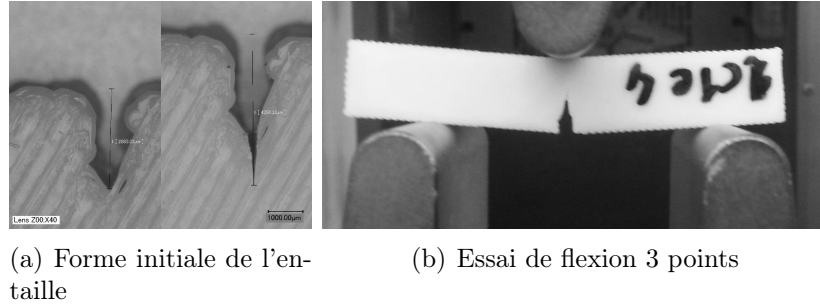
Tableau 4.1 – Mesures de K_c


Figure 4.3 – Description des essais de fissuration

2.1 État de l'art

La topographie des surfaces générées par le procédé FFF est relativement bien étudiée et l'approximation la plus employée consiste à représenter la surface extérieure comme la juxtaposition de tube de section elliptique [Ahn et al., 2009]. La direction de balayage de remplissage ainsi que la direction de coupe sont les paramètres de la stratégie de construction principalement étudiés [Galantucci et al., 2009, Pandey et al., 2003] pour leurs effets sur l'état de surface. Dans le cadre d'une étude multi-échelles de la courbure, Zeng [Zeng et al., 2014] montre l'apport d'un procédé de finition réalisée a posteriori sur l'état de surface. Afin d'améliorer la prédiction de la qualité des surfaces produites, une approche par éléments finis est proposée par [Jamiolahmadi and Barari, 2014] de façon à prédire la topographie de surface obtenue par le procédé FFF, à partir de la mesure d'un nombre réduit de points. Enfin, dans le cadre du frittage de poudre Pupo *et al.* [Pupo et al., 2015] établissent expérimentalement des relations entre l'état de surface obtenu et les paramètres de pilotage du procédé.

Ainsi, la plupart des travaux sur le domaine portent sur les relations entre les paramètres du procédé et la surface extérieure produite. Ils ne s'intéressent pas au couplage entre les formes intérieures produites (équivalentes à des porosités) avec des éléments comme la direction et le mode de balayage (figure 4.4), l'épaisseur des couches, etc.

Les formes à observer étant internes à la pièce, il convient de changer de moyens de mesure. Les travaux s'orientent donc vers l'utilisation de résultats de mesure en tomographie [Chiffre et al., 2014]. La tomographie (Computed Tomography - CT) est

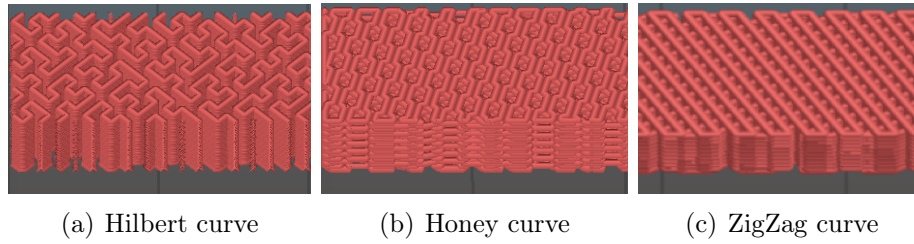


Figure 4.4 – Mode remplissage

de plus plus employée pour la mesure des pièces mécaniques avec une incertitude de l'ordre du micromètre [Wang et al., 2015, Bartscher et al., 2007]. Néanmoins, l'une des difficultés du traitement des mesures issues de CT concerne le seuillage appliqué sur les images afin de déterminer la frontière de la pièce [Dewulf et al., 2013]. En effet, toutes les mesures dimensionnelles utilisant la tomographie sont basées sur la détermination de la frontière du matériau. Ainsi, c'est une géométrie estimée de la pièce qui est la grandeur de mesure issue de la tomographie [Kruth et al., 2011]. Il est possible de réduire cette incertitude dans la détermination des frontières [Lifton et al., 2015] par une étude subvoxel afin de numériquement améliorer la résolution [Yagüe-Fabra et al., 2013]. Il a été montré lors d'une inter-comparaison de différents tomographes [Carmignato, 2012], qu'une incertitude de mesure de l'ordre de 1/10 de la taille initiale du voxel peut être obtenue par une étude en sub-voxel.

Ainsi, les travaux envisagés portent sur la proposition d'une méthode d'analyse de mesure par tomographie en vue de discriminer les paramètres de la stratégie de remplissage employé en fabrication additive. Cette méthode est basée sur une analyse multi-échelles de l'aire relative interne de la surface totale de la pièce incluant les porosités et formes internes.

2.2 Traitement des données

Les données issues de la tomographie sont un ensemble d'images correspondant à différentes coupes de la pièce dans une direction donnée. La quantité de données est relativement importante et peut facilement dépasser le Go. Finalement, les données se présentent sous la forme d'un espace voxélisé, l'information correspondant au niveau de gris de chacun des voxels est directement corrélée à la densité de la matière présente dans ce dernier (figure 4.5). La taille de chacun des voxels et donc la résolution de la

mesure dépendent des paramètres réglés lors de celle-ci. L'une des difficultés est alors de déterminer la frontière entre les voxels correspondant à la pièce étudiée et l'air extérieur ou le support de pièce.

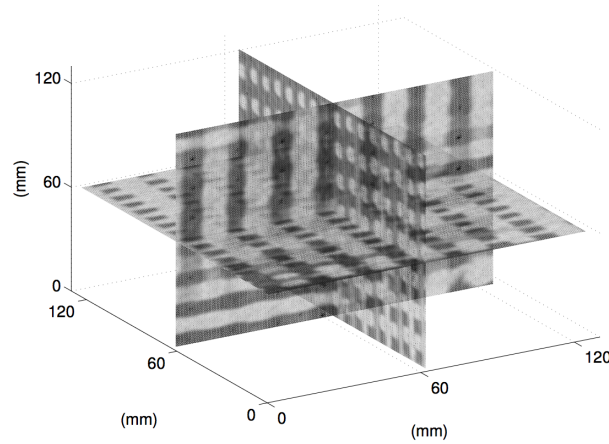


Figure 4.5 – Représentation des données mesurées

Cette frontière est déterminée par une binarisation des images correspondant à un seuillage par rapport à un niveau de gris donné, et l'application d'un filtrage morphologique. Afin de pouvoir utiliser ces données pour l'analyse de l'influence des paramètres de la stratégie de remplissage, nous avons développé à l'aide d'outils Matlab[®] notre propre méthodologie d'extraction de surfaces frontière de la pièce similaire à celle développée par Shahabi [Shahabi and Ratnam, 2016]. Pour la valider, nous avons étudié la mesure d'une cale céramique ZrO_2 de 1,3 mm. Cette cale de classe 0 garantit un défaut de planéité de $0,10 \mu m$ et de parallélisme de $0,10 \mu m$ entre les deux faces. L'incertitude sur la distance est de $\pm 0,12 \mu m$ à 20° . Les mesures ont été réalisées pour une taille de voxel de $5,9 \mu m \times 5,9 \mu m \times 5,9 \mu m$. Le volume de mesure étudié est de $200 \times 300 \times 1132$ voxels.

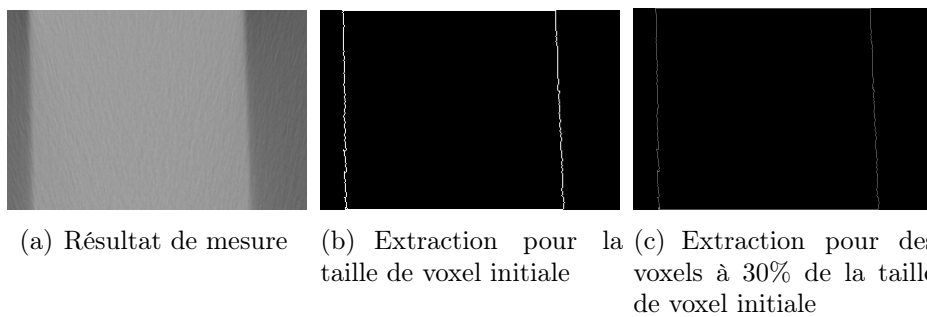


Figure 4.6 – Représentation de la cale étalon et de l'extraction réalisée

Une fois notre méthode d'extraction appliquée (figure 4.6), nous appliquons le protocole Qualipso [Mehdi-Souzani et al., 2016] afin de déterminer le bruit de mesure sur chacune des faces et l'erreur de justesse. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 4.2. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec la qualité de la pièce mesurée validant ainsi notre méthode. Néanmoins des zones présentant des dispersions provoquées par la déviation de rayons X à l'intérieur du matériau de la pièce, le détecteur ou la procédure de mesures ont pu être observées comme décrit par Kruth [Kruth et al., 2011]. Elles n'ont pas été ici représentées, mais soulignent les précautions à prendre lors de l'utilisation de tomographe. Un autre aspect des résultats concerne l'évolution du bruit et de la justesse en fonction de la taille de voxel étudié. En effet, pour une taille de voxel plus petite que la taille initiale (obtenue par interpolation linéaire) les valeurs sont plus faibles. Ceci laisse à penser qu'une étude en subpixel permet d'affiner la détermination de la peau de la pièce.

Taille des voxels	Bruit Face 1 (μm)	Bruit Face 2 (μm)	Justesse (μm)
Taille initiale	3	3,3	25,5
30% de la taille initiale	2,4	2,7	21,2

Tableau 4.2 – Test sur un artefact étalon

2.3 Une première approche : Étude de l'aire relative interne et variation de l'échelle

Nous proposons une première approche [Quinsat et al., 2016] pour l'analyse des mesures issues de tomographie en vue de relier les paramètres de pilotage du procédé avec la résistance mécanique de la pièce produite. Cette approche est basée sur la mesure de l'aire relative interne de la peau de la pièce et de son évolution en fonction de l'échelle d'observation. Cette notion d'aire relative interne est définie dans une première partie, puis dans un second temps la notion d'échelle liée à la taille des voxels est introduite.

2.3.1 Mesure de l'aire relative interne

À partir de l'extraction de la frontière entre la pièce et l'environnement présentée au paragraphe 2.2, il est possible de définir l'aire de la peau de la pièce (figure 4.7). L'étape d'extraction permet de définir un ensemble de voxels frontière $V_{\text{frontière}}$. Ainsi, l'aire de la peau correspond à la somme des aires de l'ensemble des faces $A_{i,j}$ des voxels

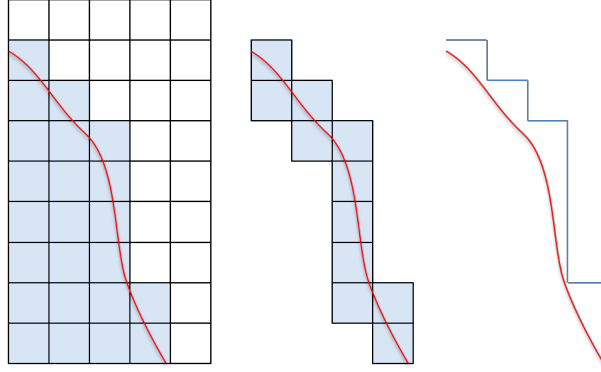


Figure 4.7 – Extraction de l'aire de la peau

de $V_{frontière}$ en contact avec l'extérieur. Le calcul peut être mené de la manière suivante :

$$A = \sum_{i \in V_{frontière}} \sum_{j=1}^6 A_{i,j} \cdot \delta_{i,j} \quad (4.1)$$

avec :

$$\begin{cases} \delta_{i,j} = 1 \text{ si la face } j \text{ est en contact avec l'extérieur} \\ \delta_{i,j} = 0 \text{ si la face } j \text{ n'est pas en contact avec l'extérieur} \end{cases} \quad (4.2)$$

Cette aire étant dépendante des dimensions de la zone étudiée, nous définissons donc une aire relative interne A_r , tel que $A_r = A/A_{englobant}$ où $A_{englobant}$ correspond à l'aire du voxel englobant la zone étudiée. Sur une mesure d'échantillon réalisée en ABS, l'ensemble $V_{frontière}$ correspond aux voxels blancs de la figure 4.8(c) pour une représentation en 2D. La figure 4.9(b) représente ces mêmes voxel en 3D. $A_{englobant}$ est ici l'aire des six faces du cube englobant les mesures (figure 4.9(a)).

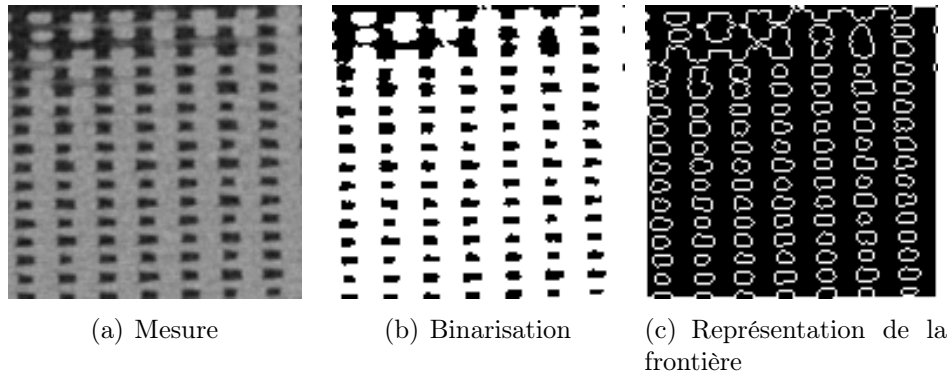


Figure 4.8 – Représentation des différentes étapes dans le plan XY

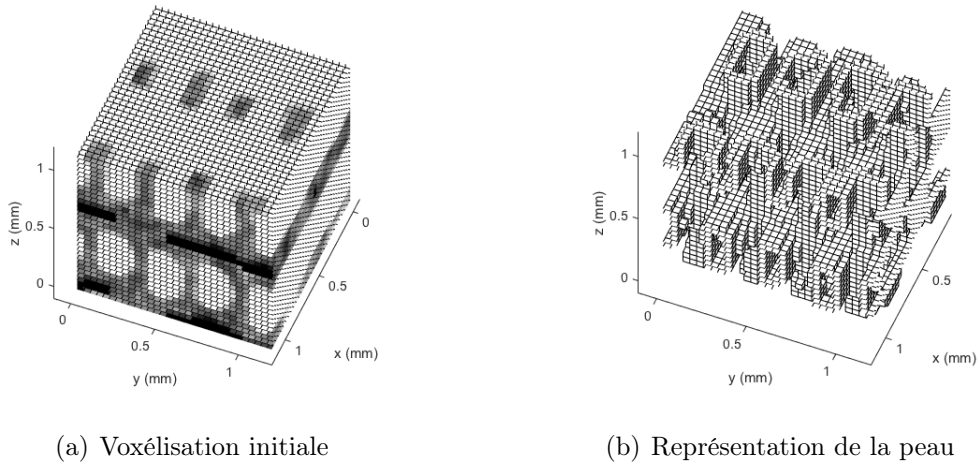


Figure 4.9 – Représentation de l'extraction de la peau de la pièce

2.3.2 Évolution de l'échelle

Cette aire relative interne est définie pour une taille de voxel donnée, les dimensions de ce dernier intervenant dans les termes $A_{i,j}$. Afin de mener une analyse multi-échelles [Brown et al., 1998], nous proposons de faire varier les dimensions des voxels étudiés de façon à avoir des voxels plus petits et plus grands que la dimension initiale liée à la mesure. Par rapport aux approches classiques sur maillage, les travaux proposés portent sur un format de description plus riche, associant voxel et densité de matière. Ils se distinguent aussi par la possibilité d'analyser les échantillons à une échelle inférieure à l'échelle de mesure grâce aux outils de subpixélisation. Ainsi, la valeur de la densité de matière de chacun des voxels est obtenue par interpolation linéaire en utilisant les outils de traitement d'image de Matlab[®]. L'influence de cette variation sur la détermination de l'ensemble $V_{frontière}$ est illustrée à la figure 4.10.

Ainsi, le paramètre A_r est calculé pour différentes échelles, c'est-à-dire différentes dimensions de voxel. Il est alors possible de tracer la courbe représentant l'évolution de ce paramètre (figure 4.11) dans une échelle logarithmique. L'échelle correspondante à la mesure initiale est indiquée par un trait vertical bleu sur cette figure. Cette courbe présente une faible évolution linéaire pour des échelles inférieures à l'échelle de mesure initiale. Le paramètre d'aire relative interne A_r est donc peu sensible à une étude en subvoxel.

Cependant, la valeur d'aire relative interne diminue fortement lorsque l'on augmente la dimension des voxels. Cette diminution présente aussi une portion linéaire. Lorsque

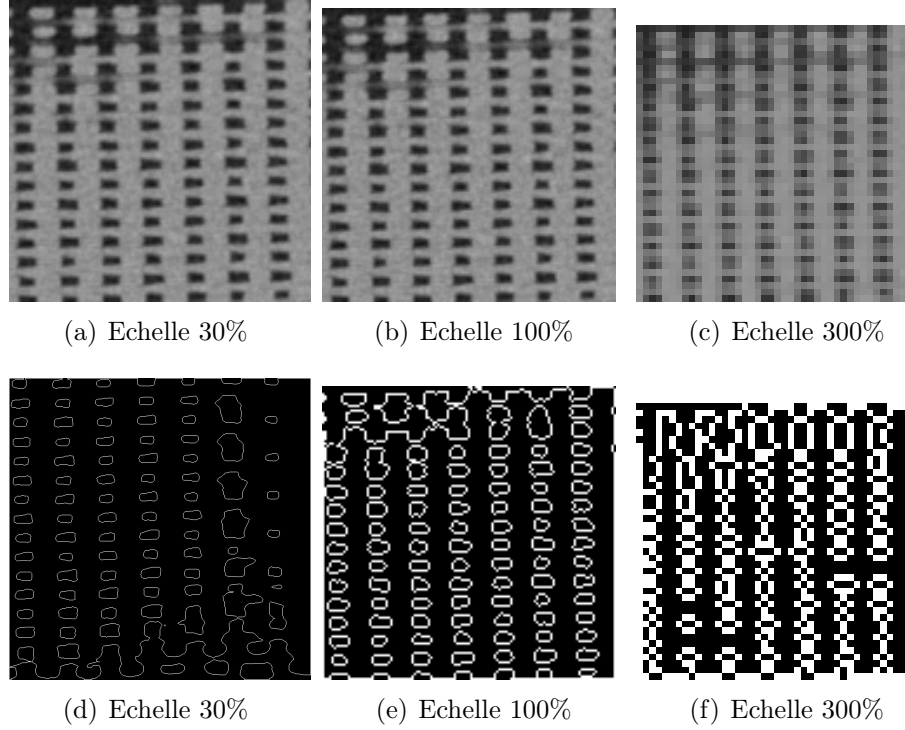


Figure 4.10 – Évolution des données mesurées et de la frontière extraite en fonction de la taille de voxel étudiée (% de la résolution de la mesure)

la dimension des voxels devient trop grande, l'aire relative interne devient inférieure à 1, indiquant finalement que la mesure devient trop dégradée et perd de son sens physique.

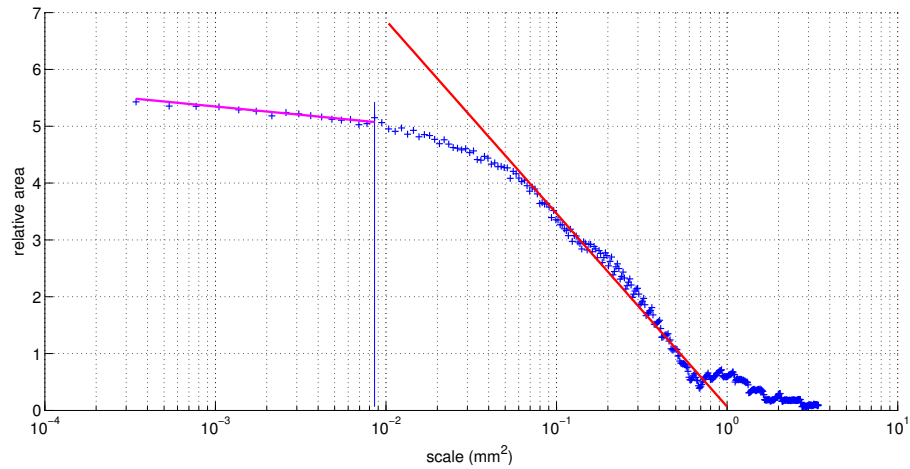


Figure 4.11 – Analyse multi-échelles

2.3.3 Premiers résultats

Afin de montrer l'intérêt de cette méthode d'analyse par détermination de l'aire relative interne A_r , nous l'appliquons maintenant sur deux cas différents. L'un porte sur

la discrimination de stratégie de remplissage, l'autre plus particulièrement sur l'étude des paramètres de pilotage de ce remplissage.

2.3.3.a Comparaison des stratégies de remplissage

Pour la première application, trois éprouvettes réalisées avec une épaisseur de remplissage identique ($0,25\text{ mm}$) et un remplissage à 60% sont étudiées. Ces éprouvettes sont produites selon trois stratégies de remplissage différentes (figure 4.4). Les trajectoires utilisées sont des courbes de Hilbert, des formes en nid d'abeille ou des zig-zag à 30° . La taille de voxel initiale est de $37,8\mu\text{m} \times 37,8\mu\text{m} \times 37,8\mu\text{m}$. La taille du voxel englobant est de $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$.

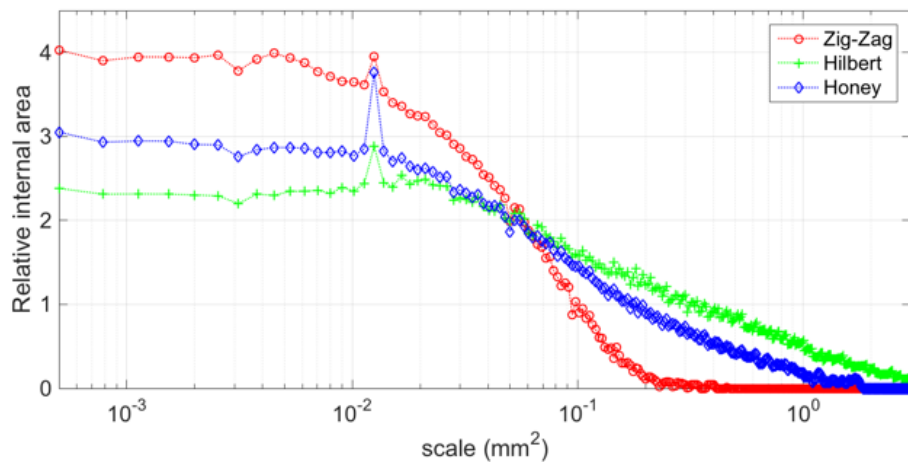


Figure 4.12 – Comparaison des méthodes de remplissage

Une analyse multi-échelles de l'aire relative interne est réalisée pour chacun des trois échantillons. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 4.12. Ils mettent clairement en évidence trois comportements différents. Les valeurs d'aire relative interne diffèrent fortement pour les faibles échelles. De plus, la diminution de cette aire relative interne avec l'augmentation de l'échelle est d'autant plus importante que la valeur initiale est plus élevée. Ainsi, cette analyse permet de discriminer complètement les modes de remplissage.

2.3.3.b Analyse des paramètres de remplissage

La deuxième étude proposée concerne l'analyse de l'influence des paramètres de remplissage sur la topographie de la surface générée à l'aide du paramètre d'aire relative interne. Pour cela, différentes éprouvettes sont produites afin de réaliser un plan d'ex-

Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Épaisseur (<i>mm</i>)	0.15	0.2	0.25
Orientation (°)	0	30	45
Remplissage	60%	80%	100%

Tableau 4.3 – Description des niveaux choisis

périence selon une table L_9 (tableau 4.4) de trois facteurs à trois niveaux (tableau 4.3). La stratégie de remplissage en zig-zag est choisie pour toutes les éprouvettes. Les trois facteurs sont donc l'épaisseur des couches, la direction de balayage et le pourcentage de remplissage.

Expérience	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tableau 4.4 – Table L_9

Ces 9 échantillons sont mesurés par tomographie dans des conditions identiques à celles présentées précédemment. Les résultats obtenus par l'analyse multi-échelles de l'aire relative interne sont représentés sur la figure 4.13. Ces résultats montrent de nouveau l'aptitude de cette représentation à discriminer les différentes topographies obtenues. Compte tenu des imprécisions du procédé, les échantillons réalisés avec un remplissage à 100% présentent des porosités, des zones sans matières entre les différentes passes, ce qui justifie que l'aire relative interne ne soit pas constante pour ces essais.

À partir de la valeur de l'aire relative interne pour la taille initiale de voxel, nous déterminons les effets de chacun des facteurs selon la méthode de Tagushi. Ces effets sont représentés sur la figure 4.14 et les valeurs de l'approximation linéaire réalisées sur chacun d'eux (en rouge sur la figure 4.14) sont données au tableau 4.5. Ces résultats montrent que l'épaisseur des couches et le pourcentage de remplissage sont les paramètres les plus influents sur l'aire relative interne. Le plus intéressant est que l'effet de l'épaisseur présente une très bonne linéarité avec un coefficient de régression linéaire proche de 0,95.

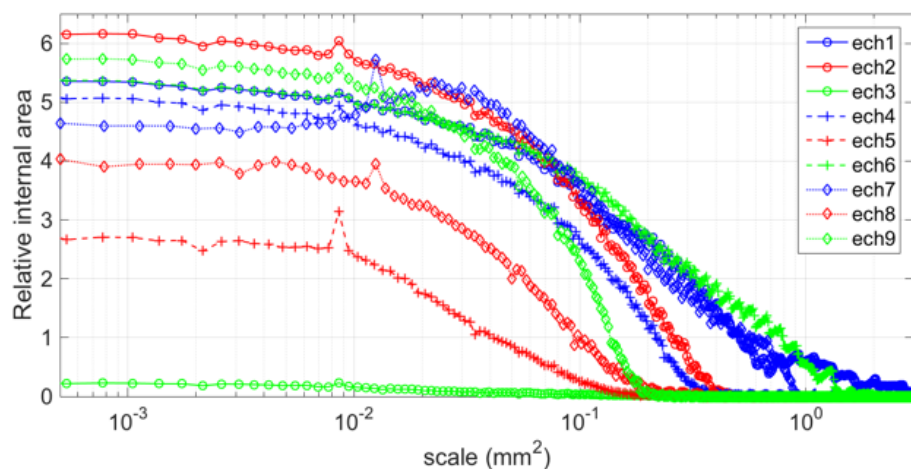


Figure 4.13 – Analyse multi-échelles

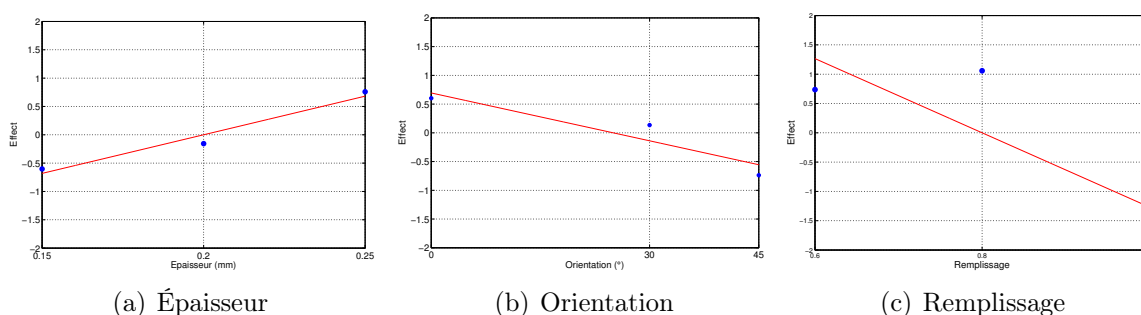


Figure 4.14 – Représentation des effets

	Épaisseur	Orientation	Remplissage
R^2	0.9534	0.9673	0.3663
Rms	0.1568	0.0506	1.2025

Tableau 4.5 – Qualité des régressions linéaires

L'optimisation des paramètres de remplissage ou des formes internes est un problème particulièrement lié au procédé de fabrication additive. L'analyse de la topographie de ces formes internes devient alors nécessaire afin de lier les paramètres du procédé avec la fonction à réaliser, le plus souvent corrélé avec les caractéristiques mécaniques du produit obtenu. Ces formes internes imposent tout naturellement un changement de moyen d'acquisition et ainsi de représentation des données. Les travaux à venir s'orientent donc vers la mise en place de paramètres permettant la discrimination de ces formes internes vis-à-vis des paramètres de pilotage du procédé, adapté à la représentation volumique des données acquises. Ainsi, une première approche, basée sur la définition d'une aire relative interne, est proposée. Dans le cadre d'un procédé par dépôt de fil, cette aire

relative est fortement couplée à l'épaisseur des couches et son évolution en fonction de la dimension de voxel choisie est discriminante vis-à-vis de la stratégie de remplissage.

3 Amélioration du temps traitement des données

Dans le cadre de la mesure de la géométrie des pièces mécaniques, les méthodes optiques sont de plus en plus utilisées, car elles permettent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure. La complémentarité des différentes technologies des systèmes de mesure disponibles associée aux différentes contraintes liées au produit (échelle de défauts mesurés, complexité de la géométrie, matériaux mis en jeu, environnement de mesure) permet d'augmenter le degré d'automatisation, la rapidité et la qualité de la numérisation. Néanmoins, une des limites majeures à l'utilisation des moyens optiques pour la mesure de géométrie concerne le post-traitement nécessaire sur les données issues de la numérisation. En effet, les données acquises par moyens optiques sont souvent hétérogènes, bruitées et peuvent comporter des lacunes en fonction de la complexité de la géométrie à numériser. Ainsi, l'analyse des mesures réalisées peut devenir complexe, et l'identification des défauts présents sur la pièce, une réelle difficulté. Un autre aspect concerne l'intégration des données acquises par différents capteurs, de façon à mettre à jour la maquette numérique de la pièce dans son état après usinage.

Afin de réduire le temps de post-traitement et améliorer la qualité des données, j'envisage d'axer mes travaux sur la mise au point de méthode de mesure permettant de délivrer une description de la géométrie acquise dans une base de défauts prédéfinie. Cette technique aurait l'avantage de fournir des mesures directement exploitables pour la qualification de la pièce mesurée. Il s'agit alors de passer de l'outil de détection de défauts décrit au chapitre 2 à un outil de mesure de défaut.

Dans le cadre de la description de défaut de forme, différentes approches ont été proposées, le plus souvent basées sur une description sous forme de maillage de la pièce à étudier. Huang [Huang and Ceglarek, 2002] utilisent une décomposition sur la base de cosinus pour exprimer le défaut de forme de la pièce. Cette technique oblige à avoir un maillage structuré de la pièce. Or, ceci n'est pas toujours possible. Franciosa [Franciosa et al., 2010] proposent d'utiliser des techniques de morphing de maillage issues de la communauté d'infographie pour exprimer ces écarts de forme. Même si cette technique permet de décrire des formes complexes sans aucune hypothèse sur la géométrie nominale

des pièces considérées, l'identification d'un ensemble correct d'opérateurs de morphing pour décrire correctement le défaut de forme à évaluer peut s'avérer difficile. Samper et Formosa [Samper and Formosa, 2007] proposent d'exprimer le défaut de forme d'une pièce grâce à une décomposition modale basée sur les modes propres de celle-ci. Cette technique est applicable quelle que soit la forme de la pièce et il existe des stratégies bien établies pour identifier un ensemble fini de paramètres décrivant le défaut de forme. Ainsi les modes propres de la pièce sont donnés par la solution de l'équation dynamique linéaire :

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{u} + \mathbf{K} \cdot u = 0 \quad (4.3)$$

avec :

- u le déplacement de chacun des nœuds pour l'ensemble des degrés de liberté du maillage de la pièce,
- \mathbf{K} la matrice de rigidité modélisant le comportement élastique de la pièce mesurée,
- \mathbf{M} la matrice de masse modélisant la distribution de masse de la pièce.

Les solutions de l'équation 4.3 sont de la forme $u_i(t) = q_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t)$ avec ω_i la pulsation propre du mode i et q_i son vecteur amplitude. Une des propriétés de ces vecteurs est de respecter la relation d'orthogonalité suivante :

$$q_i^t \cdot \mathbf{M} \cdot q_j = \delta_{ij} \quad (4.4)$$

Où δ_{ij} est le symbole de Kronecker. Les vecteurs q_i associés au produit scalaire $\langle a, b \rangle = a^t \cdot \mathbf{M} \cdot b$ forment ainsi une base de l'espace des déplacements. Samper et Formosa [Samper and Formosa, 2007] utilisent ce produit pour identifier les coordonnées modales λ_i en projetant le déplacement u de chacun des nœuds :

$$\lambda_i = q_i^t \cdot \mathbf{M} \cdot u \quad (4.5)$$

Comme la longueur d'onde du mode diminue avec la fréquence, l'ensemble de la base n'est généralement pas nécessaire pour représenter le défaut de forme.

Les perspectives de travaux envisagés s'attachent donc à intégrer la description des défauts de forme à l'aide d'une base prédéfinie dans la procédure de stéréo-corrélation précédemment présentée (chapitre 3 paragraphe 4). Une première approche consiste en l'utilisation d'une base modale comme base de défauts. Ceci présenterait deux avantages

principaux. Premièrement, le nombre de degrés de liberté du problème étudié serait relativement restreint étant donné qu'un nombre limité de modes est nécessaire pour décrire correctement les défauts de forme. Deuxièmement, le résultat de l'optimisation et donc de la mesure délivrerait directement l'influence de chacun des modes. Il serait ainsi possible de mettre au point un système de mesure permettant de donner directement la participation de chacun des défauts.

Cette approche de mesure de défaut de forme par base modale fait partie des sujets retenus pour un projet FARMAN en collaboration avec le LMT. Il fait intervenir C. Lartigue et F. Thiébaut du Lurpa et F. Hild du LMT. Je suis responsable scientifique de ce projet pour le Lurpa.

L'objectif est ensuite de se diriger vers d'autres types de défauts plus locaux, et ainsi proposer une collection de défauts directement mesurables, propres au procédé. De façon plus générale, j'envisage également l'amélioration de l'intégration de mesures multi-capteurs afin d'obtenir un même modèle de représentation de la pièce dans son état après usinage. Ceci fait l'objet des perspectives présentées dans la partie suivante.

4 Suivi de la maquette numérique : fusion de données et modification du processus

Cette partie présente plus particulièrement les projets de recherche envisagés à plus long terme. Il s'agit ici de décrire l'orientation globale que je souhaiterais donner à mes activités. Celle-ci se divise en deux problématiques identifiées au travers des activités précédemment présentées.

La première concerne le post-traitement des données issues de la numérisation. Plus particulièrement, il s'agit de gérer la fusion et le recalage de données hétérogènes (issues des différents capteurs) en relation avec le modèle CAO. La seconde concerne les actions correctives, la problématique étant de savoir comment envisager celles-ci dans le processus de fabrication de la pièce.

Ces deux aspects s'articulent autour d'un projet global concernant le suivi de la maquette numérique et tout particulièrement du modèle FAO, c'est-à-dire la mise à jour en dynamique de la modélisation de la géométrie produite et du processus associé.

4.1 Intégration des données acquises à la maquette numérique

Les opérations de contrôle des pièces mécaniques doivent permettre de quantifier les défauts géométriques par comparaison des données numérisées au modèle nominal défini par la CAO, ou tout au moins par la simulation de la géométrie de la pièce à la fin de l'opération considérée. Les travaux déjà réalisés permettent d'assurer une cohérence des données acquises avec le repère de définition du nominal et participe à faciliter cette comparaison. Néanmoins, pour le moment la gestion des données non homogènes, tant par leurs natures que par l'échelle de celles-ci, issues de différents capteurs n'est pas réalisée.

Ce problème peut être abordé en utilisant la complémentarité de deux approches précédemment présentées, la déformation de maillage sur données numérisées et la stéréocorrélation sur maillage, il est alors possible d'envisager l'intégration de différentes données dans un même modèle de représentation de la pièce. En effet, la déformation de maillage sur données numérisées permet de délivrer un résultat de mesure de structure identique au modèle nominal. D'autre part, une analyse multi-échelles en utilisant différentes tailles de maille et différentes images de la pièce (plus ou moins agrandies) pourrait être réalisée par stéréocorrélation. L'objectif est de pouvoir ainsi faire vivre un modèle numérique tout au long du processus usinage et de mesure, en l'enrichissant continuellement des données acquises, et d'intégrer pleinement une mesure multi-capteurs/multi-échelles. Néanmoins, ce travail nécessite de proposer un format de représentation de la pièce adapté à une étude multi-échelles afin de pouvoir obtenir les différents maillage de façon associative. Ce point devra sans doute faire l'objet d'une collaboration avec la communauté scientifique liée travaillant plus particulièrement sur la modélisation et la gestion de la maquette numérique.

4.2 Intégration des corrections à la maquette numérique

Une seconde perspective des travaux est liée à la réalisation d'actions correctives (figure 2.1). Une façon, peut-être la plus directe, de les envisager est d'étudier les changements de trajectoire d'usinage à effectuer lorsque le défaut mesuré le permet. L'étude des modifications à apporter aux trajectoires permettant d'éliminer les défauts identifiés à l'étape de mesure est l'un des objectifs des travaux de thèse de D. M. Phan. L'outil de détection mis en place au chapitre 2 permettant de localiser les écarts géométriques,

directement dans le modèle FAO, il est alors possible de trouver la portion de trajectoire ayant produit le défaut. La mesure de la grandeur de cet écart géométrique, associée à une déformation locale de la trajectoire, permettrait de réaliser une pièce conforme dès l'usinage de la deuxième pièce.

Cette première approche se limite uniquement à l'étude de la sous-phase considérée. Si l'on observe le processus dans sa globalité avec différentes phases et sous-phases, il est sans doute nécessaire de s'interroger sur d'autres possibilités de correction. En effet, le défaut observé n'est pas nécessairement dû uniquement à la sous-phase étudiée, il peut provenir d'une sous phase amont ou de son impact sur le processus. De plus, il est peut-être aussi possible de modifier le processus en aval de la sous-phase considérée afin d'obtenir une pièce bonne. Ainsi, les travaux pourraient être étendus à la modification non pas d'une trajectoire d'usinage, mais à la modification complète de la gamme de fabrication. En effet, la mesure en cours de fabrication de la géométrie de la pièce comparée au modèle FAO, devrait permettre de définir l'opération suivante ou de redéfinir l'opération précédente. Il s'agit alors d'intégrer la mesure *in-situ* dans un contexte de modèle FAO *dynamique*. C'est-à-dire d'un modèle FAO pouvant évoluer en relation directe avec les résultats de mesure.

5 Conclusion

Ce chapitre présente les perspectives de recherche envisagées. Elles sont regroupées selon trois thèmes principaux : l'analyse des formes internes, l'amélioration du temps de traitement des données acquises et le suivi de la maquette numérique.

Le premier thème est motivé par une évolution des procédés de fabrication et de mesure. Il s'agit de mettre en relation les paramètres de remplissage des formes internes en fabrication additive avec l'analyse des données issues de tomographie. À partir d'un résultat de mesure sous forme d'un ensemble de voxel, une proposition de paramètre basé sur l'aire relative interne est réalisée. Deux cas d'étude montrent que l'analyse de l'évolution de cette aire relative interne, en fonction de la taille de voxel utilisée, est un indicateur pertinent pour discriminer les stratégies de remplissage utilisées.

Le deuxième thème concerne l'amélioration du temps de traitement des données acquises. En effet, ce temps est un élément pénalisant fortement l'efficacité de la mesure *in-situ*. L'idée originale proposée s'appuie sur la mise au point d'un système de mesure

ne délivrant plus une information dimensionnelle, mais une information directement liée à une base de défaut. Ainsi, une première approche de stéréo-corrélation d'images, basée sur la définition d'une base modale est présentée.

Enfin, le dernier thème, correspondant à des projets à plus long terme, porte sur le suivi de la maquette numérique et en particulier du modèle FAO, c'est-à-dire sur le modèle comprenant à la fois la géométrie nominale, mais aussi les états intermédiaires de la pièce ainsi que les trajectoires. Deux axes sont proposés permettant la mise à jour à la fois de la géométrie de la pièce à l'aide des données acquises, mais aussi le processus, afin de prendre en compte les écarts géométriques observés.

Conclusion

Actuellement, les pièces de formes complexes sont réalisées par des procédés de plus en plus automatisés, à l'aide de machines outil à 5 axes ou de robots. Le processus de fabrication s'appuie sur la définition d'une gamme de fabrication et se décompose en différentes étapes, à partir de la définition du cahier des charges. À chacune de ces étapes, des écarts géométriques entre la forme souhaitée et la forme obtenue peuvent apparaître. La surveillance des procédés de fabrication est donc nécessaire, imposant parfois une mesure à 100% des pièces produites lors de la phase de la stabilisation du processus. Dans ce contexte, mes travaux portent sur la maîtrise de la qualité des surfaces produites en vue d'améliorer le procédé de fabrication. Trois points principaux se distinguent :

- L'étude de la topographie 3D de surface comme intermédiaire entre la fonction et le processus,
- La mesure *in-situ* avec capteur sans contact,
- La définition de stratégie de mesure en contexte *in-situ*.

La définition des paramètres de la stratégie de fabrication est un élément déterminant dans le processus de fabrication. La première partie de mes recherches est consacrée à l'amélioration de la prédiction de la topographie des surfaces générées par le procédé d'usinage. Ces travaux sont motivés par le fait que la topographie est un des éléments déterminants quant à la bonne réalisation des fonctions de service associées à la pièce. Grâce à cette démarche, des relations entre la fonction de la surface générée et les paramètres du procédé ont pu être établies. L'étude s'est portée sur la détermination de l'influence des paramètres d'usinage en fraisage 5 axes continus, sur les paramètres d'état de surface fonctionnels. Cette étude s'appuie sur la réalisation d'un plan d'expériences numériques, rendu possible par l'outil de prédiction mis au point. Une analyse multi-échelles a par ailleurs mis en évidence la pertinence d'une étude de la topographie de surface à l'échelle de l'avance à la dent pour analyser la tenue en fatigue des pièces

produites. Enfin, les travaux sur le polissage ont permis de proposer des stratégies de pré-polissage maîtrisant le défaut de forme généré.

Un autre aspect de mes travaux sur l'amélioration de la qualité des surfaces concerne l'intégration des opérations de contrôle au sein du moyen de production, afin de réaliser une mesure dite *in-situ*. La difficulté principale de l'intégration de la mesure au sein du processus de fabrication est la perte de disponibilité de la machine lors de l'inspection de la pièce. Il devient alors nécessaire de maîtriser l'efficacité de la mesure. Il a été montré que la réduction du temps de mesure et des incertitudes de mesure passe par une amélioration et une adaptation des gammes de contrôle, afin de prendre en compte les spécificités de la mesure *in-situ*. Mes activités de recherche se sont tout particulièrement centrées sur l'utilisation des capteurs sans contact, qui assurent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure et leurs intégrations dans le moyen de production pour la mesure *in-situ*. Les écarts géométriques étant de différentes échelles, une réflexion sur la sélection et la collaboration de différents capteurs est proposée. Enfin, le temps alloué à la mesure complète de la pièce pouvant pénaliser le temps total de production, il a été choisi de définir un outil de pré mesure, directement basé sur la description de la géométrie nominale issue de la FAO. Cet outil permet de détecter et de localiser très rapidement, les zones de non-conformité de la pièce usinée par rapport au modèle défini en FAO.

Dans le cadre de la mesure *in-situ* des pièces mécaniques, les méthodes optiques présentent de nombreux avantages ; elles permettent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure. Néanmoins, malgré l'évolution des techniques de mesure sans contact et la simplification des systèmes de mesure associés, la définition d'une méthodologie de numérisation c'est-à-dire d'une stratégie de numérisation d'une pièce est une véritable difficulté. En effet, la gestion de la complétude de l'acquisition, des zones de recouvrement et de la qualité des données acquises sont encore des éléments mal maîtrisés ou tout au moins mal rationalisés. Ces points sont d'autant plus préjudiciables pour une mesure intégrée au sein du moyen de production, les temps alloués à la mesure étant réduits. En ce sens, les travaux réalisés ont pour objectif de proposer des stratégies de numérisation minimisant le nombre de configurations capteur et contrôlant la qualité des données acquises. Un aspect complémentaire des travaux concerne la quantité minimale d'information requise pour le suivi de production. Ainsi, un outil de bouchage de trous de numérisation permettant de délivrer un résultat de mesure de

structure identique au modèle nominal a été proposé. Enfin, dans le but d'améliorer l'efficacité de la mesure, un système de mesure délivrant une information directement compatible avec le modèle numérique de la pièce a été présenté. Basé sur de la stéréocorrélation d'images, ce système permet d'obtenir, à partir des déformations à appliquer au modèle nominal, une représentation la géométrie de la pièce mesurée.

Ainsi, les trois thèmes développés dans mes travaux nécessitent de maîtriser à la fois les activités de fabrication et également les activités de mesure de façon à pouvoir les fusionner dans une même activité. Dès lors, ils participent de façon originale au contrôle de la qualité des surfaces produites.

Bibliographie

- [Ahn et al., 2009] Ahn, D., Kweon, J.-H., Kwon, S., Song, J., and Lee, S. (2009). Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16) :5593 – 5600.
- [A.M. Ramos, 2003] A.M. Ramos, C. Relvas, J. S. o. (2003). The influence of finishing milling strategies on texture roughness and dimensional deviations on the machining of complex surface. *Journal of Materials Processing Technology*, 136 :209–216.
- [Apt 360, 1983] Apt 360 (1983). Part programming manual format.
- [Audfray, 2009] Audfray, N. (2009). Numérisation intelligente basée sur des critères qualité. Master’s thesis, ENS Cachan.
- [Audfray, 2012] Audfray, N. (2012). *A global approach for automatic 3D part inspection*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Bartscher et al., 2007] Bartscher, M., Hilpert, U., Goebbels, J., and Weidemann, G. (2007). Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (ct) measurements. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1) :495 – 498.
- [Beaubier et al., 2014] Beaubier, B., Dufour, J., Hild, F., Roux, S., Lavernhe-Taillard, S., and Lavernhe-Taillard, K. (2014). CAD-based calibration of a 3D-DIC system : Principle and application on test and industrial parts. *Exp. Mech.*, 54(3) :329–341.
- [Bešić et al., 2011] Bešić, I., Gestel, N. V., Kruth, J.-P., Bleys, P., and Hodolić, J. (2011). Accuracy improvement of laser line scanning for feature measurements on CMM. *Opt. Lasers Eng.*, 49(11) :1274–1280.
- [Besl and Kay., 1992] Besl, P. J. and Kay., N. D. M. (1992). A method for registration of 3d shape. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(5).
- [Bouguet, 2010] Bouguet, J.-Y. (2010). Camera calibration toolbox for matlab.
- [Bourdet et al., 1996] Bourdet, P., Mathieu, L., Lartigue, C., and Ballu, A. (1996). The concept of the small displacement torsor in metrology. *Series on advances in Mathematics for Applied Sciences*, 40 :110–122.

- [Breteau, 2006] Breteau, T. (2006). Modélisation géométrique et analyse de la surface générée en fraisage 5 axes. Master's thesis, ENS Cachan.
- [Brient, 2004] Brient, A. (2004). *Etude de l'influence du processus de fabrication sur les performances des propulseurs marins : approche multimétiers de l'usinage d'hélices*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- [Brown et al., 1998] Brown, C. A., Johnsen, W. A., and Hult, K. M. (1998). Scale-sensitivity, fractal analysis and simulations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(5-6) :633 – 637.
- [Bruzzzone et al., 2008] Bruzzzone, A., Costa, H., Lonardo, P., and Lucca, D. (2008). Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2) :750 – 769.
- [Buj-Corral et al., 2012] Buj-Corral, I., Vivancos-Calvet, J., and Domínguez-Fernández, A. (2012). Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53(1) :151 – 159.
- [Carmignato, 2012] Carmignato, S. (2012). Accuracy of industrial computed tomography measurements : Experimental results from an international comparison. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1) :491 – 494.
- [Chen and Su, 1996] Chen, F. and Su, C. (1996). Vision-based automated inspection system in computer integrated manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11(3) :206–213.
- [Chen et al., 2013] Chen, J., Wu, X., Wang, M. Y., and Li, X. (2013). 3d shape modeling using a self-developed hand-held 3d laser scanner and an efficient ht-icp point cloud registration algorithm. *Optics & Laser Technology*, 45 :414–423.
- [Chen et al., 2005a] Chen, J.-S., Huang, Y.-K., and Chen, M.-S. (2005a). A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9) :1077 – 1084.
- [Chen et al., 2005b] Chen, J.-S. B., Huang, Y.-K., and Chen, M.-S. (2005b). Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9) :1070 – 1076.

- [Chiffre et al., 2014] Chiffre, L. D., Carmignato, S., Kruth, J.-P., Schmitt, R., and Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(2) :655 – 677.
- [Cho et al., 2004] Cho, M.-W., Lee, H., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement part ii : Local inspection planning. *KSME International Journal*, 18(8) :1358–1367.
- [Cho and Seo, 2002] Cho, M.-W. and Seo, T.-I. (2002). Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on cad/cam/cai integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(8) :607–617.
- [Choi and Szymczak, 2009] Choi, J. and Szymczak, A. (2009). Fitting solid meshes to animated surfaces using linear elasticity. *ACM Transactions on Graphics - TOG*, 28(1) :1–10.
- [D.A. Axinte, 2002] D.A. Axinte, R. C. D. (2002). Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models. *Journal of Materials Processing Technology*, 127 :325–335.
- [Denkena et al., 2015] Denkena, B., Böß, V., Nesper, D., and Rust, F. (2015). Simulation and evaluation of different process strategies in a 5-axis re-contouring process. *Procedia CIRP*, 35 :31 – 37. MIC2015 – 15th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry.
- [Derigent et al., 2006] Derigent, W., Chapotot, E., Ris, G., Remy, S., and Bernard, A. (2006). 3d digitizing strategy planning approach based on a cad model. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(1) :10–19.
- [Dewulf et al., 2013] Dewulf, W., Kiekens, K., Tan, Y., Welkenhuyzen, F., and Kruth, J.-P. (2013). Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1) :535 – 538.
- [Dornaika and Garcia, 1997] Dornaika, F. and Garcia, C. (1997). Robust camera calibration using 2d to 3d feature correspondences. *Proceedings of the International Symposium SPIE Optical Science Engineering and Instrumentation, Videometrics V*, 3174 :123–133.
- [Dubreuil, 2013] Dubreuil, L. (2013). Comparaison de protocoles de mesure sans contact pour l'évaluation de défauts d'usinage. Master's thesis, ENS Cachan.

- [Dubreuil, 2016] Dubreuil, L. (2016). *Mesure in-situ par moyens optiques : Application à l'amélioration du procédé - Soutenance Prévue Automne 2016*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Dubreuil et al., 2016] Dubreuil, L., Dufour, J., Quinsat, Y., and Hild, F. (2016). Mesh-based shape measurements with stereocorrelation principle and first results. *Exp. Mech.*
- [Dubreuil et al., 2014] Dubreuil, L., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2014). Multi-sensor approach for multi-scale machining defect detection. In *Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing, Toulouse*, pages 1–7.
- [Dubreuil et al., 2015] Dubreuil, L., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2015). Calibration based on part set-up measurement for on-machine inspection using vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 9(4) :317–323.
- [Duc, 2006] Duc, E. (2006). Intégration géométrique du processus de fabrication des pièces usinées. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université Blaise Pascal – Clermont II*.
- [Dufour et al., 2015] Dufour, J.-E., Beaubier, B., Hild, F., and Roux, S. (2015). CAD-based displacement measurements. Principle and first validations. *Exp. Mech.*, 55(9) :1657–1668.
- [Everton et al., 2016] Everton, S. K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R. K., and Iqbal, A. T. C. (2016). Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 95 :431–445.
- [Faugeras et al., 1992] Faugeras, O., Luong, Q., and Maybank, S. (1992). Camera self-calibration : Theory and experiments. In *Proc. 2nd ECCV*, pages 321–334. Springer-Verlag.
- [Faugeras and Toscani, 1987] Faugeras, O. and Toscani, G. (1987). Camera calibration for 3D computer vision. *International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, pages 240–247.
- [Franciosa et al., 2010] Franciosa, P., Gerbino, S., and Patalano, S. (2010). Simulation of variational compliant assemblies with shape errors based on morphing mesh approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1) :47–61.

- [Galantucci et al., 2009] Galantucci, L., Lavecchia, F., and Percoco, G. (2009). Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1) :189 – 192.
- [Gao et al., 2006] Gao, T., Zhang, W., Qiu, K., and Wan, M. (2006). Numerical simulation of machined surface topography and roughness in milling process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(1) :96–103.
- [Grandguillaume et al., 2015] Grandguillaume, L., Lavernhe, S., Quinsat, Y., and Tournier, C. (2015). Mold manufacturing optimization : A global approach of milling and polishing processes. *Procedia CIRP*, 31 :13 – 18. 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO).
- [Guillemot, 2010] Guillemot, N. (2010). *Surface integrity and fatigue life prediction of components manufactured by milling*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Guiot, 2012] Guiot, A. (2012). *Modeling and simulation of automatic pre-polishing process on 5-axis machining center*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Harvent, 2010] Harvent, J. (2010). *Shape measurement using a multiple-view Digital Image Correlation (DIC) method : application to the inspection of large-scale aerospace structures*. Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III. La version officielle a été déposée sur le site de l'UPS : <http://thesesups.ups-tlse.fr/1369/>.
- [Harvent et al., 2013] Harvent, J., Coudrin, B., Brèthes, L., Orteu, J.-J., and Devy, M. (2013). Multi-view dense 3d modelling of untextured objects from a moving projector-cameras system. *Machine Vision and Applications*, 24(8) :1645–1659.
- [Huang and Ceglarek, 2002] Huang, W. and Ceglarek, D. (2002). Mode-based decomposition of part form error by discrete-cosine-transform with implementation to assembly and stamping system with compliant parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1) :21–26.
- [Iso 12179, 2000] Iso 12179 (2000). Spécification géométrique des produits (gps) - état de surface : Méthode du profil-étalonnage des instruments à contact (palpeur).
- [Iso 230-2, 2014] Iso 230-2 (2014). Code d'essai des machines-outils – partie 2 : Détermination de l'exactitude et de la répétabilité de positionnement des axes à commande numérique.

- [Iso 25178-2, 2012] Iso 25178-2 (2012). Spécification géométrique des produits (gps) - état de surface : Surfamique - partie 2 : Termes, définitions et paramètres d'états de surface.
- [Jamiolahmadi and Barari, 2014] Jamiolahmadi, S. and Barari, A. (2014). Surface topography of additive manufacturing parts using a finite difference approach. *Journal of Manufacturing Science in Engineering*, 136(4) :1–8.
- [Jerard et al., 1989] Jerard, R., Hussaini, S., Drysdale, R., and Schaudt, B. (1989). Approximate methods for simulation and verification of numerically controlled machining programs. *The Visual Computer*, 5(6) :329–348.
- [Jung et al., 2001] Jung, Y.-H., Kim, J.-S., and Hwang, S.-M. (2001). Chip load prediction in ball-end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1–3) :250 – 255. International symposium on advanced forming and die manufacturing technology.
- [K. D. Bouzakis, 2003] K. D. Bouzakis, P. Aichouh, K. E. (2003). Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling with ball end tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 :499–514.
- [Kang et al., 2001] Kang, M., Kim, K., Lee, D., Kim, J., and Kim, N. (2001). Characteristics of inclined planes according to the variations of the cutting direction in high-speed ball-end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17 :323–329.
- [Katz et al., 2007] Katz, S., Tal, A., and Basri, R. (2007). Direct visibility of point sets. *ACM Trans. Graph.*, 26(3).
- [Kim and Chu, 1999] Kim, B. and Chu, C. (1999). Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method. *Computer-Aided Design*, 31(8) :485 – 494.
- [Klocke et al., 2011] Klocke, F., Dambon, O., and Behrens, B. (2011). Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels. *Production Engineering*, 5 :475–483. 10.1007/s11740-011-0301-6.
- [Ko et al., 2001] Ko, T., Kim, H. S., and Lee, S. S. (2001). Selection of the machining inclination angle in high-speed ball end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17 :163–170.
- [Kruth et al., 2011] Kruth, J., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., Chiffre, L. D., and Weckenmann, A. (2011). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2) :821 – 842.

- [Kull Neto et al., 2015] Kull Neto, H., Diniz, A., and Pederiva, R. (2015). The influence of cutting forces on surface roughness in the milling of curved hardened steel surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–10.
- [Lartigue et al., 2014] Lartigue, C., Quinsat, Y., Mehdi-souzani, C., Zuquete-Guarato, A., , and Tabibian, S. (2014). Voxel-based path planning for 3d scanning of mechanical parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(3) :220–227.
- [Lavernhe et al., 2010] Lavernhe, S., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2010). Model for the prediction of 3d surface topography in 5-axis milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(9-12) :915–924.
- [Lavernhe et al., 2014] Lavernhe, S., Quinsat, Y., Lartigue, C., and Brown, C. (2014). Realistic simulation of surface defects in five-axis milling using the measured geometry of the tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(1-4) :393–401.
- [Lavernhe et al., 2008] Lavernhe, S., Tournier, C., and Lartigue, C. (2008). Kinematical performance prediction in multi-axis machining for process planning optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(5-6) :534–544.
- [Lavest et al., 1999] Lavest, J.-M., Viala, M., and Dhome, M. (1999). Quelle précision pour une mire d’étalonnage? *Traitement du Signal*, 16(3) :241–254.
- [Lee et al., 2004] Lee, H., Cho, M.-W., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement part i : Global inspection planning. *KSME International Journal*, 18(8) :1349–1357.
- [Lifton et al., 2015] Lifton, J. J., Malcolm, A. A., and McBride, J. W. (2015). On the uncertainty of surface determination in x-ray computed tomography for dimensional metrology. *Measurement Science and Technology*, 26(3) :035003.
- [Liu and Loftus, 2004] Liu, N. and Loftus, M. (2004). Prediction of surface quality from ball nose milling in high speed machining applications. In *5th International Conference on Integrated design and Manufacturing in Mechanical Engineering*.
- [Loriot et al., 2008] Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2008). Non-model based method for an automation of 3d acquisition and post-processing. *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 7(3) :67–82.
- [Ma et al., 1993] Ma, S., Wei, G., and Huang, J. (1993). Segment based camera calibration. *Journal of Computer Science and Technology*, 8(1) :11–16.

- [Martins et al., 2005] Martins, F. A. R., Garcia-Bermejo, J. G., Casanova, E. Z., and Gonzalez, J. R. P. (2005). Automated 3d surface scanning based on cad model. *Mechatronics*, 15(7) :837 – 857.
- [Mears et al., 2009] Mears, L., Roth, J., Djurdjanovic, D., Yang, X., and Kurfess, T. (2009). Quality and inspection of machining operations : Cmm integration to the machine tool. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng*, 131(5) :1–13.
- [Mehdi-Souzani, 2006] Mehdi-Souzani, C. (2006). *Intelligent 3D digitising of unknown shape's object based on quality criterions*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Mehdi-Souzani et al., 2016] Mehdi-Souzani, C., Quinsat, Y., Lartigue, C., and Bourdet, P. (2016). A knowledge database of qualified digitizing systems for the selection of the best system according to the application. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16 :15–23.
- [Novovic et al., 2004] Novovic, D., Dewes, R., Aspinwall, D., Voice, W., and Bowen, P. (2004). The effect of machined topography and integrity on fatigue life. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(2-3) :125 – 134.
- [Panchetti et al., 2010] Panchetti, M., Pernot, J.-P., and Véron, P. (2010). Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications. *Computer-Aided Design*, 42(8) :693–707.
- [Pandey et al., 2003] Pandey, P. M., Reddy, N. V., and Dhande, S. G. (2003). Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3) :323 – 331.
- [Pernot et al., 2006] Pernot, J.-P., Moraru, G., and Viçæron, P. (2006). Filling holes in meshes using a mechanical model to simulate the curvature variation minimization. *Computers and Graphics*, 30(6) :892–902.
- [Pessoles and Tournier, 2009] Pessoles, X. and Tournier, C. (2009). Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 :3665–3673.
- [Phan et al., 2016] Phan, M., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2016). Simulation of laser-sensor digitizing for on-machine part inspection -article soumis-. In *Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing, Catane*, pages 1–10.

- [Poulhaon et al., 2014] Poulhaon, F., Leygue, A., M.Rauch, Hascoët, J.-Y., and Chinnesta, F. (2014). Simulation-based adaptative toolpath generation in milling processes. *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, 15(3-4) :263–284.
- [Preston, 1927] Preston, F. (1927). The theory and design of plate glass polishing machines. *Journal of the Society of Glass Technology*, 11 :214–256.
- [Prieto et al., 1999] Prieto, F., Redarce, H., Lepage, R., and Boulanger, P. (1999). Range image accuracy improvement by acquisition planning. In *Vision Interface '99, Trois-Rivières, Canada*, pages 1–8.
- [Pupo et al., 2015] Pupo, Y., Monroy, K. P., and Ciurana, J. (2015). Influence of process parameters on surface quality of coormo produced by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5-8) :985–995.
- [Quinsat, 2004] Quinsat, Y. (2004). *Contribution au choix de stratégies d’usinage : application à la finition des pièces de formes complexes*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont fd.
- [Quinsat et al., 2015] Quinsat, Y., Guiot, A., and Tournier, C. (2015). Tool wear modeling for constant removal rate in two-bodies automated polishing. *Int. J. of Abrasive Technology*, 7(2) :73–89.
- [Quinsat and Lartigue, 2015] Quinsat, Y. and Lartigue, C. (2015). Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4) :411–421.
- [Quinsat et al., 2016] Quinsat, Y., Lartigue, C., Brown, C. A., and Hattali, L. (2016). Multi-scale surface characterization in additive manufacturing using ct -article soumis. In *Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing, Catane*, pages 1–10.
- [Quinsat et al., 2011] Quinsat, Y., Lavernhe, S., and Lartigue, C. (2011). Characterization of 3d surface topography in 5-axis milling. *Wear*, 271(3-4) :590 – 595. The 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces.
- [Quinsat and Sabourin, 2006] Quinsat, Y. and Sabourin, L. (2006). Optimal selection of machining direction for three-axis milling of sculptured parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(11-12) :1132–1139.

- [Quinsat et al., 2008] Quinsat, Y., Sabourin, L., and Lartigue, C. (2008). Surface topography in ball end milling process : Description of a 3d surface roughness parameter. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3) :135 – 143.
- [Quinsat and Tournier, 2012] Quinsat, Y. and Tournier, C. (2012). In situ non-contact measurements of surface roughness. *Precision Engineering*, 36(1) :97 – 103.
- [R. Baptista, 2000] R. Baptista, J. F. A. S. o. (2000). Three and five axes milling of sculptured surfaces. *Journal Of Materials Processing Technology*, 103 :398–403.
- [Raffaelia et al., 2013] Raffaelia, R., Mengonib, M., and Germanic, M. (2013). Context dependent automatic view planning : The inspection of mechanical components. *Computer-Aided Design and Applications*, 10(1) :111–127.
- [Rémy, 2004] Rémy, S. (2004). *Contribution á l’automatisation du processus d’acquisition de formes complexes á l’aide d’un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique*. Theses, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Roques, 2013] Roques, P. (2013). *Modélisation de systèmes complexes avec SysML*. Eyrolles.
- [Samper and Formosa, 2007] Samper, S. and Formosa, F. (2007). Form defects tolerancing by natural modes analysis. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(1) :44–51.
- [Saravanakumar et al., 2009] Saravanakumar, P., Manesh, K., Singaperumal, M., and Ramamoorthy, B. (2009). Modelling of fluid continuum considering 3d surface parameters in hydraulic assemblies. *Precision Engineering*, 33(1) :99 – 106.
- [Savio et al., 2007] Savio, E., Chiffre, L. D., and Schmitt, R. (2007). Metrology of free-form shaped parts. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 56(2) :810 – 835.
- [Scandiffio et al., 2015] Scandiffio, I., Diniz, A., and de Souza, A. (2015). Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened aisi d6 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–12.
- [Schwenke et al., 2002] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., and Kunzmann, H. (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(2) :685 – 699.

- [Scott et al., 2005] Scott, R. S., Ungar, P. S., Bergstrom, T. S., Brown, C. A., Grine, F. E., Teaford, M. F., and Walker, A. (2005). Dental microwear texture analysis shows within-species diet variability in fossil hominins. *Nature*, 436(7051) :693–695.
- [Shahabi and Ratnam, 2016] Shahabi, H. and Ratnam, M. (2016). Simulation and measurement of surface roughness via grey scale image of tool in finish turning. *Precision Engineering*, 43 :146 – 153.
- [Shiraishi, 1989] Shiraishi, M. (1989). Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes -part 2 : In-process techniques for workpieces. *Precision Engineering*, 11(1) :27 – 37.
- [Souto-Lebel, 2014] Souto-Lebel, A. (2014). *Effect of surface integrity on the fatigue life of a bainitic steel after finishing milling*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Souto-Lebel et al., 2011] Souto-Lebel, A., Guillemot, N., Lartigue, C., and Billardon, R. (2011). Characterization and influence of defect size distribution induced by ball-end finishing milling on fatigue life. *Procedia Engineering*, 19 :343 – 348. 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI).
- [Sutton and Hild, 2015] Sutton, M. and Hild, F. (2015). Recent advances and perspectives in digital image correlation. *Exp. Mech.*, 55(1) :1–8.
- [Sutton et al., 2009] Sutton, M., Orteu, J.-J., and Schreier, H. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements : Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [Thomas, 2014] Thomas, T. R. (2014). Roughness and function. *Surface Topography : Metrology and Properties*, 2(1) :014001.
- [Toh, 2004] Toh, C. (2004). Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. *Precision Engineering*, 28(4) :386 – 398.
- [Tournier, 2009] Tournier, C. (2009). Contribution à l’amélioration de la qualité des surfaces fabriquées sur centre d’usinage à 5 axes. *Habilitation à Diriger des Recherches, ENS Cachan*.
- [Tsai, 1986] Tsai, R. Y. (1986). An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL*,.

- [Vacharanukul and Mekid, 2005] Vacharanukul, K. and Mekid, S. (2005). In process dimensional inspection sensors. *Measurement*, 38(3) :204–218.
- [Vukašinović et al., 2010] Vukašinović, N., Bračun, D., Možina, J., and Duhovnik, J. (2010). The influence of incident angle, object colour and distance on cnc laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1) :265–274.
- [Vulliez et al., 2014] Vulliez, M., Gleason, M. A., Souto-Lebel, A., Quinsat, Y., Lartigue, C., Kordell, S. P., Lemoine, A. C., and Brown, C. A. (2014). Multi-scale curvature analysis and correlations with the fatigue limit on steel surfaces after milling. *Procedia CIRP*, 13 :308 – 313. 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI).
- [Wang et al., 2015] Wang, J., Leach, R. K., and Jiang, X. (2015). Review of the mathematical foundations of data fusion techniques in surface metrology. *Surface Topography : Metrology and Properties*, 3(2) :023001.
- [Wang and Y.-C., 2012] Wang, L.-C. and Y.-C., H. (2012). Hole filling of triangular mesh segments using systematic grey prediction. *Computer-Aided Design*, 44(12) :1182–1189.
- [Weckenmann et al., 2009] Weckenmann, A., Jiang, X., Sommer, K.-D., Neuschaefer-Rube, U., Seewig, J., Shaw, L., and Estler, T. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2) :701 – 721.
- [Whitehouse, 2001] Whitehouse, D. (2001). Function maps and the role of surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(13–14) :1847 – 1861.
- [Whitehouse, 2009] Whitehouse, D. (2009). A new look at surface metrology. *Wear*, 266(5–6) :560 – 565. Metrology and Properties of Engineering Surfaces.
- [Wu et al., 2011] Wu, X., Chen, J., Wang, M. Y., and Li, X. (2011). Hong-tan based icp registration for partially overlapping range images. *VRCAI*.
- [Xú et al., 2016] Xú, S., Anwer, N., Mehdi-Souzani, C., Harik, R., and Qiao, L. (2016). Step-nc based reverse engineering of in-process model of nc simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [Yagüe-Fabra et al., 2013] Yagüe-Fabra, J., Ontiveros, S., Jiménez, R., Chitchian, S., Tosello, G., and Carmignato, S. (2013). A 3d edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1) :531 – 534.

- [Yandayan and Burdekin, 1997] Yandayan, T. and Burdekin, M. (1997). In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(10) :1423 – 1439.
- [Yau and Tsou, 2015] Yau, H. and Tsou, L. (2015). Efficient nc simulation for multi-axis solid machining with a universal apt cutter. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 9(2) :1 – 10.
- [Zeng et al., 2014] Zeng, Y., Wang, K., Wang, B., and Brown, C. (2014). Multi-scale evaluations of the roughness of surfaces made by additive manufacturing. In *ASPE - 2014 Spring Topical Meeting*.
- [Zhao et al., 2008] Zhao, F., Xu, X., and Xie, S. (2008). Step-nc enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2) :200 – 216.
- [Zhao et al., 2012] Zhao, H., Kruth, J.-P., Gestel, N. V., Boeckmans, B., and Bleys, P. (2012). Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe. *Measurement*, 45(5) :1057 – 1066.
- [Zhao and Xu, 2010] Zhao, Y. F. and Xu, X. (2010). Enabling cognitive manufacturing through automated on-machine measurement planning and feedback. *Advanced Engineering Informatics*, 24(3) :269 – 284. The Cognitive Factory.
- [Zhou et al., 2010] Zhou, X., Su, Z., and Liu, X. (2010). A novel energy-based method for mesh deformation. *International Conference on Educational and Information Technology*, pages 153–156.
- [Zhu et al., 2007] Zhu, L., Barhak, J., Srivatsan, V., and Katzr, R. (2007). Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces. *Int J Adv Manuf Technol*, 32 :505–515.
- [Zienkiewicz and Taylor, 1989] Zienkiewicz, O. and Taylor, R. (1989). *The Finite Element Method*. McGraw-Hill, London (UK), 4th edition.
- [Zuquete Guarato, 2013] Zuquete Guarato, A. (2013). *3D Metrology of parts with complex shapes by optical sensors : An application for crankshaft balancing*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.

Troisième partie

Principaux Articles

**S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue,
C. Brown, Realistic simulation of
surface defects in five-axis milling
using the measured geometry of the
tool, International Journal of
Advanced Manufacturing
Technology, Vol. 74, pp. 393-401, 2014**

Realistic simulation of surface defects in five-axis milling using the measured geometry of the tool

Sylvain Lavernhe · Yann Quinsat · Claire Lartigue · Christopher Brown

Received: 18 September 2013 / Accepted: 2 February 2014 / Published online: 3 June 2014
© Springer-Verlag London 2014

Abstract Managing macro- and micro-geometry of surfaces during manufacturing processes is a key factor for their following uses. Indeed, micro-geometry and surface topography are directly linked to the performances of functions (contact, friction, lubrication, etc.) by texture parameters to ensure the desired local geometry. Common models for simulation of surface topography are based on ideal geometry of the machining tool and cannot represent surface defects. The actual prediction and simulation of defects are one step forward in a competitive context. In this paper, the realistic model proposed aims to simulate and predict as finely as possible local defects of machined surfaces taking into account the actual edge geometry of the cutting tool. The combined use of the machining kinematics and of the measured geometry of the cutting edges leads to the representation of the geometrical envelope of the surface using a Zbuffer technique. Simulation assessment is carried out by the analysis of 3D surface topography parameters such as surface complexity and relative area and by a comparison of simulation results to an experimental case of study.

Keywords Surface topography · Defects · Realistic modeling and simulation · Surface analysis · Surface machining

1 Introduction

Surface topography characterization resulting from five-axis milling is a current and essential issue. Some studies have enhanced the importance of 3D surface topography in engineering applications. 3D surface topography influences mechanical and physical properties of contacting parts and plays a major role in surface integrity, which affects fatigue life [18, 21]. The defect size distribution and the defect orientation are of great interest for a better understanding of the mechanical behavior under loads.

The characterization of surface topography as a function of cutting conditions is thus a challenge, in particular for the prediction of the shape, size, and orientation of the defects induced by machining. Several authors handle this issue through simulations. Most simulations concern three-axis ball-end milling and are based on the 3D modeling of both the tool geometry and the workpiece. Kim and Chu [14] described the texture obtained in milling by using a texture superposition model considering the effect of the fillet radius. In this study, the authors investigate the influence of the feedrate, the cutter type, and the runout. Bouzakis et al. focused on the motion of the cutting edge, which is segmented into elementary linear sections of constant width. These authors highlight the influence of the tool orientation, the transverse step, and the feedrate on the machined surface quality [8]. Liu et al. detailed a method based on the solid modeling of each cutter flute [17]. The workpiece surface is sampled in the (*XY*) plane by a set of parallel lines (called spikes) to the *Z*-axis (tool axis). The cutter tool gen-

S. Lavernhe (✉) · Y. Quinsat · C. Lartigue
LURPA ENS de Cachan Université Paris Sud 1161 avenue du
President Wilson, 94235 Cachan cedex, France
e-mail: sylvain.lavernhe@lurpa.ens-cachan.fr

Y. Quinsat
e-mail: yann.quinsat@lurpa.ens-cachan.fr

C. Lartigue
e-mail: claire.lartigue@lurpa.ens-cachan.fr

C. Brown
Surface Metrology Laboratory, Mechanical Engineering Department,
Worcester Polytechnic Institute Worcester, MA, 01609 USA
e-mail: brown@wpi.edu

erates a volume which truncates the spikes. The remaining parts of the reference spikes provide a good approximation of the surface finish which can be linked with the cutting parameters. In a previous work, we proposed to link the machining strategy in three-axis ball-end milling with a 3D surface roughness parameter and to optimize the machining direction according to this parameter [19]. In their work, Arizmendi et al. [5] proposed a model accounting for the tool parallel axis offset. The cutting edge geometry is represented as a cylindrical helix projected onto a spherical surface. The topography prediction is thus obtained, considering the equation of the cutting edge trajectory and the equation of the material swept by the tool. More recently, Buj-Corral et al. [9] focused on the prediction of roughness generated in ball-end milling of flat surfaces. The surface is modeled as a set of horizontal planes (the vertical Z defining the tool axis), each of them sampled according to a square grid (X , Y). Each cutting tool tooth is modeled as an elliptical curve of increasing radius. The topography is built based on a set of intersections between the tool motion and the part. The effect of cutting conditions is taken into account as well as the effect of some characteristic of the tool geometry. In their approach, Denkena et al. [10] considered the surface topography as the sum of the “kinematic topography,” resulting from the cutting edge movement, and the “stochastic topography,” including surface irregularities and cracks. The first one is obtained using Boolean operations, simulating material removal, between the CAD model of the tool and a discrete model of the workpiece. The “stochastic topography” is generally obtained by subtracting the kinematic topography to surface measurements. Nevertheless, the authors proposed a method to evaluate this stochastic topography with an empirical model based on the process force simulations.

Few works handle the case of five-axis milling. Kim and Chu [14] proposed to simulate the 3D topography obtained in five-axis milling by using a filleted ball-end tool. The envelope of the tool movement is modeled by successive tool locations according to the feed per tooth. Antoniadis et al. [4] consider the general case of multi-axis with ball-end tools. The cutting edge of the tool is decomposed into an elementary cutting edge of trapezoidal shape. The workpiece

is modeled as a set of linear segments (or needles) defining a brush. The geometrical model of the cutting tool follows the selected milling operation and intersects the set of needles. The part material remaining defines the milled surface and gives its 3D topography. Starting from the expression of the trajectory equation of the cutting edge relative to the workpiece and the tool paths, Zhang et al. introduced a new and general iterative method to simulate roughness in multi-axis ball-end milling [11, 23]. The authors investigated in particular the effects of the tool inclination and of the cutting mode on surface roughness. Indeed, their study showed that surface roughness remains mostly unchanged beyond a certain limiting inclination angle and that the cutting mode influences mainly sculptured surface roughness.

In the case of five-axis milling, we proposed in a first study a theoretical approach to simulate the 3D surface topography obtained in five-axis milling with a filleted ball-end cutter tool integrating actual feedrate evolution. The material removal simulation relies on the well-known N-buffer method and requires the modeling of the tool geometry, the surface and the actual tool trajectory [16, 20]. The surface is discretized according to a rectangular grid with lines directed along the local normal to the surface. The set of lines is truncated by the envelope of the tool trajectory leading to the 3D surface topography (Fig. 1).

The local actual feedrate evolution is obtained by a kinematical predictive model. The tool is assumed to be rigid. It is approximated by a local meshing built from the CAD theoretical model of the tool geometry. The comparison between simulations and experimental trials shows good agreement between the predicted 3D topography and the experimental one (Fig. 2).

Nevertheless, and as for most methods available in literature, the modeling of the cutting process only attempts geometrical fidelity on scales of the curvature of a tool with a smooth cutting edge. This leads to a good representation of the general pattern, but the model is not able to predict small defects appearing at the bottom of the valleys (Fig. 3).

However, the knowledge of the size and distribution of the defects is essential in fracture mechanics to establish the relationship between defect distribution and the

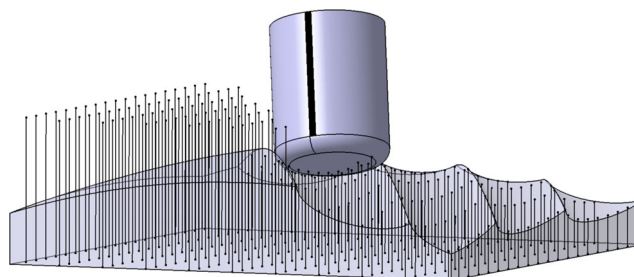
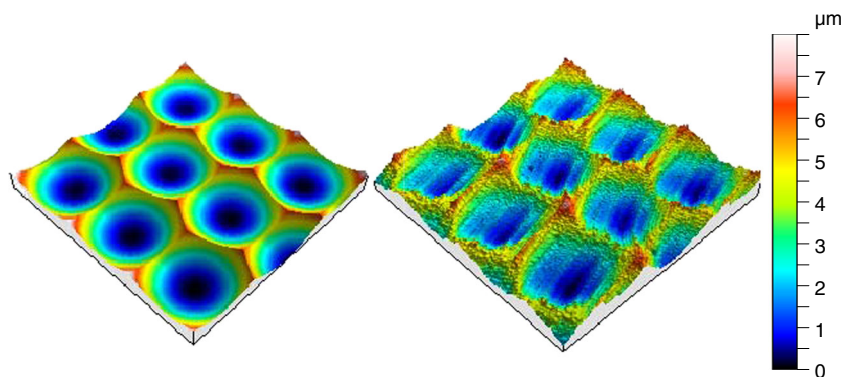


Fig. 1 3D surface topography simulation in five-axis milling

Fig. 2 Surface topography: simulated (*left*) and rendering of a measurement of an actual machined surface (*right*)



fracture probability. Studies have enhanced the effect of micro-geometry on fatigue life [12, 18]. Fatigue failure of a mechanical part can originate from micro-scratches on the surface. By considering the statistical defect size distribution that exists in an effective volume, it is possible to calculate the failure probability of the structure. For small defects (less than $5\text{ }\mu\text{m}$), Souto-Lebel et al. [21] proposed to model the defect size population as a beta function and used this model to identify the defect distribution leading to experimental fatigue limits and compared it favorably to the distribution obtained by direct measurement.

In addition, the general direction of the texture lay or anisotropy is of great importance with regard to the load direction. To predict actual surface topography, in contrast with Dekena et al., one can consider that the difference between the measured topography and the topography that was simulated using classical tools (also called “kinematic topography”) is not stochastic. The difference might rather be due to finer scale phenomena not taken into account in simulation, e.g., actual tool geometry, and tool deflection. In fact, as displayed in Fig. 3, local defects in the bottom of the valleys seem to repeat in the machining (or feed) direction. It can be observed that a large population of defects are smaller than $10\text{ }\mu\text{m}$. This is probably related to defects of the edge of the cutting tool. Such defects are not predictable if the geometry of the cutting edge is supposed to be smooth. A change of scale is required.

Therefore, the prediction of local defects requires the modeling of the tool surface characteristics at a finer scale, more similar to that used for grinding [6, 13]. Generally speaking, most simulations of the grinding process are

based on models describing the macro- and micro-geometry of the grinding wheel, the grit size, the grit volume, and the grit distribution. These parameters are obtained from an experimental characterization of the grinding tool. Actually, the cutting edge distribution used to simulate the relative motion between the grinding wheel and the workpiece is obtained by measuring the wheel topography. As a result, surface roughness predictions are in good agreement with the experimental ones.

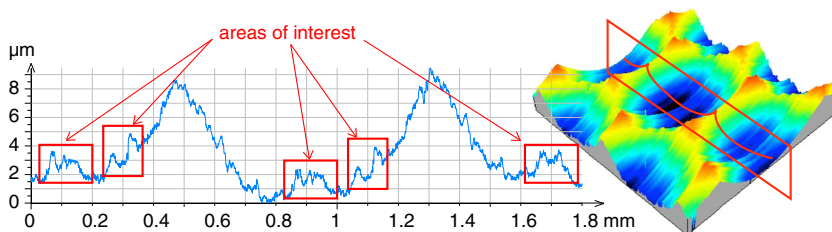
In a similar way, we propose to improve 3D surface topography prediction in milling by characterizing the actual cutting edge of the tool. For this purpose, the tool cutting edge is measured using an Alicona infinite focus system which measures the actual topography of the cutting edge. The latter is integrated in the simulation method previously implemented for five-axis milling surface topography prediction to account for the measured topography of the tool.

2 Model for surface topography simulation with measured tool topography

The material removal simulation relies on the well-known N-buffer method and requires the modeling of the surface, the tool geometry, and the actual tool trajectory [16, 20].

The surface is discretized according to a rectangular grid. At each point of the grid, a line directed along the local normal to the surface is defined. The set of lines is truncated by the envelope of the tool trajectory, and the remaining part defines the 3D topography of the machined surface (Fig. 1).

Fig. 3 Actual defects in the bottom of the valleys



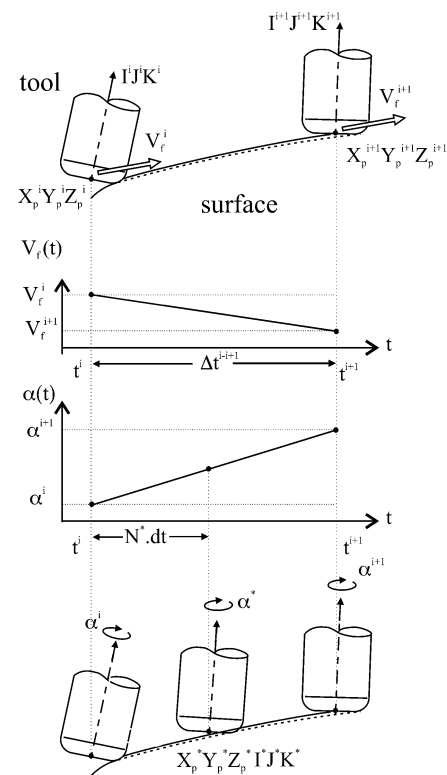
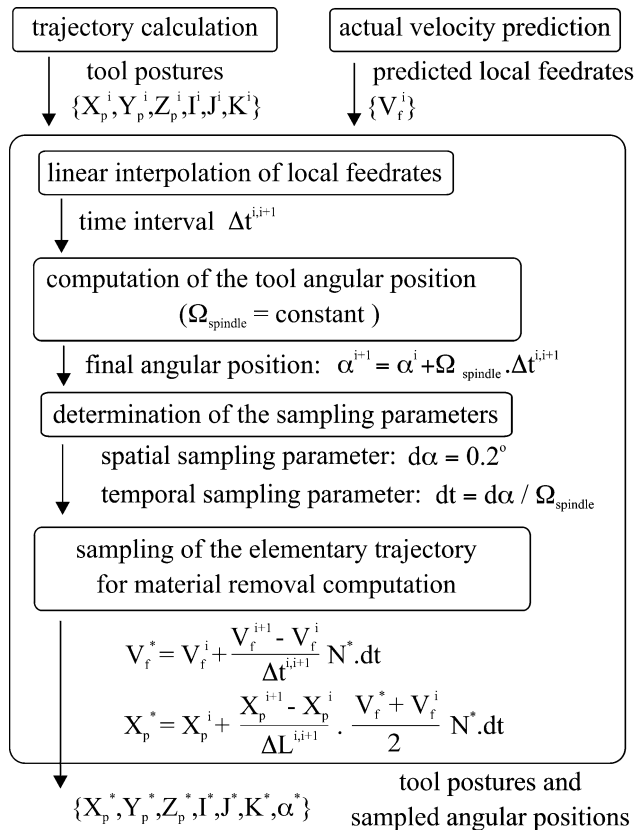


Fig. 4 Material removal simulation process

The tool, considered as rigid, is approximated as a local mesh expressed in the STL format. Only active cutting edges are considered to reduce the number of nodes and so as the calculation time. In previous works, these cutting edges were assumed to be smooth. More details on the mesh characteristics are given in Section 3. For each simulation step of the model, the mesh is transformed versus the workpiece according to the kinematics of the five-axis trajectory.

Concerning the tool trajectory, the input of the material simulation model is the actual tool trajectory expressed as a set of tool postures and corresponding feedrates. The latter

are calculated based on a model of velocity prediction which gives a good estimation of the local feedrate of the tool teeth [15].

The simulation of material removal thus consists of two main steps:

1. Calculation of the spindle angular positions at each tool posture
2. Trajectory sampling preceding the N-buffer computation

Based on a linear interpolation of the tool trajectory between the local postures $\{X_p, Y_p, Z_p\}$, the time

Fig. 5 Description of the measured cutting edge

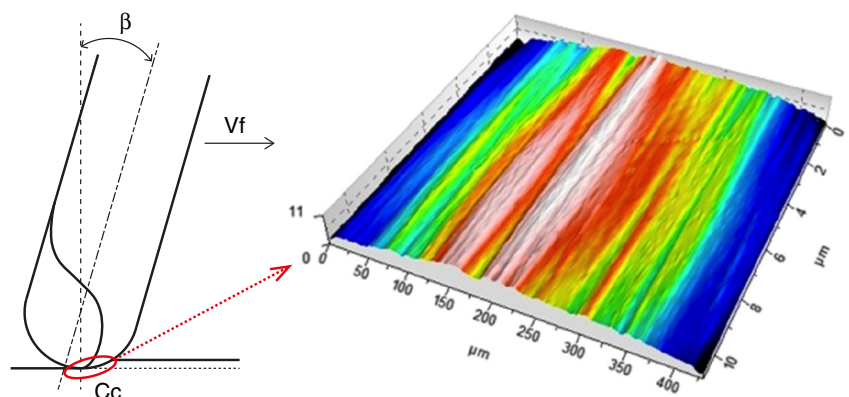


Table 1 Mesh description

	Edge length (μm)	Face area (μm^2)
Mean	0.79	0.25
Standard deviation	0.23	0.10

interval Δt separating two postures is calculated as follows:

$$\Delta L^{i,i+1} = \sqrt{(X_p^{i+1} - X_p^i)^2 + (Y_p^{i+1} - Y_p^i)^2 + (Z_p^{i+1} - Z_p^i)^2} \quad (1)$$

$$\Delta t^{i,i+1} = \frac{\Delta L^{i,i+1}}{\frac{V_f^{i+1} - V_f^i}{2}} \quad (2)$$

in which the local feedrate V_f is linearly interpolated. Let Ω_{spindle} be the rotational velocity of the spindle, supposed to be constant regardless of fluctuations in the actual feedrate, angular positions of the tool axis α are given by:

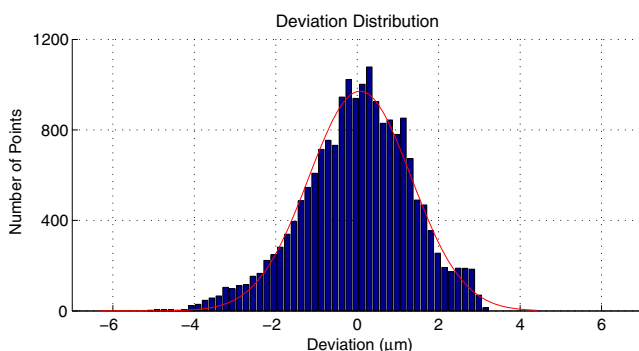
$$\alpha^{i+1} = \alpha^i + \Omega_{\text{spindle}} \cdot \Delta t^{i,i+1} \quad (3)$$

The elementary trajectory defined between two tool postures is checked considering a fixed geometrical step $d\alpha$ to ensure a good discretized description of the envelop of the tool movement:

$$dt = \frac{d\alpha}{\Omega_{\text{spindle}}} \quad (4)$$

Given this elementary time step dt , it is thus possible to discretize the time interval Δt and determine the number of samples N_{samples} for each linear interpolation by the integer part and then the current sampling number N^* :

$$N^* \in \llbracket 0 \dots N_{\text{samples}}^{i,i+1} \rrbracket \quad \text{with} \quad N_{\text{samples}}^{i,i+1} = \left\lfloor \frac{\Delta t^{i,i+1}}{dt} \right\rfloor \quad (5)$$

**Fig. 6** Mesh point distribution

This is used in the calculation of the sampled tool velocity V_f^* and locations of the components X_p^* , Y_p^* or Z_p^* along the elementary trajectory:

$$V_f^* = V_f^i + \frac{V_f^{i+1} - V_f^i}{\Delta t^{i,i+1}} \cdot N^* \cdot dt \quad (6)$$

$$X_p^* = X_p^i + dX^* = X_p^i + \frac{X_p^{i+1} - X_p^i}{\Delta L^{i,i+1}} \cdot \frac{V_f^* + V_f^i}{2} \cdot N^* \cdot dt \quad (7)$$

The components I^* , J^* , and K^* of the tool axis orientation \mathbf{u} are computed so that the orientation vector of the tool runs in a plane created by the start and end vectors \mathbf{u}^i and \mathbf{u}^{i+1} for each linear interpolation. The rotation angle θ^* between the start vector \mathbf{u}^i and an intermediate orientation \mathbf{u}^* respects the ratio between the angle and the linear displacement covered:

$$\theta^* = \theta^{i,i+1} \cdot N^* \cdot \frac{dt}{\Delta t^{i,i+1}} \quad (8)$$

The intermediate orientation vector \mathbf{u}^* is given by the Rodrigues' rotation formula, Eq. 9, with \mathbf{w} the unit vector defining the axis of rotation (cross-product of the start and end vectors).

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^i \cos \theta^* + (\mathbf{w} \times \mathbf{u}^i) \sin \theta^* + \mathbf{w}(\mathbf{w} \cdot \mathbf{u}^i)(1 - \cos \theta^*) \quad (9)$$

The interpolated angular position of the tool α^* is directly given by:

$$\alpha^* = \alpha^i + \Omega_{\text{spindle}} \cdot N^* \cdot dt \quad (10)$$

Finally, the simulated machined surface is obtained by computing the intersections between the normal lines representing the surface and the tool for each configuration $\{X_p^*, Y_p^*, Z_p^*, I^*, J^*, K^*, \alpha^*\}$.

The whole simulation method for material removal is summarized in Fig. 4.

This model leads to simulations in good agreement with experimental results in three-axis as well as five-axis milling and regardless of the tool geometry [16]. However, as aforementioned, the model failed in the prediction of chaotic small defects. The main reason is likely due to the ideal modeling of the tool cutting edges. Therefore, the simulation is improved by integrating a realistic description of the cutting edge instead of the perfect geometrical description.

3 Experimental setup

The actual geometry of the cutting edge is only accessible through measurement. For this purpose, once the tool is selected, its cutting edges have to be measured before machining. To control the process better, it is easier to consider just one cutting edge. Therefore, only the track associated to this tooth will be left on the part surface

Table 2 Mechanical properties of the bainitic steel used for the trial

E (MPa)	R_m (MPa)	Σ_v (MPa)	C (MPa)	g	A (%)	Hardness (HV)
190,000	1,080	480	188,000	580	17	315

after machining. To illustrate our purpose, the machining of a plane surface with a ball-ended tool inclined by an tilt angle β in the feed direction V_f is proposed (Fig. 5).

The tool cutting edge is measured using an Alicona infinite focus. Data provided by the manufacturer state the best vertical resolution of the measurement system is 20 nm, and the vertical repeatability is 8 nm. For the simulation and to limit the number of points (18,790 points), only the functional part around the contact point C_c of the cutting edge is considered. This functional portion of the cutting edge is meshed in a STL format giving 36,389 facets. The dimensional characteristics of the mesh used are given in Table 1. The analysis of noise on the mesh is not easy. Indeed, the study of the distribution of points around a theoretical sphere (Fig. 6) shows that it is difficult to differentiate the points associated to the cutting edge from those corresponding to the rake face and flank face. However, given the characteristics of the measuring system used, the resulting mesh is compatible with our need.

A specimen of high-strength steel (50CrMo4 bainitic steel; see Table 2 for specimen mechanical properties) is machined in five axes with a constant tilt angle is taken equal to 20° on a HSM milling center using a ball-ended tool ($R = 5$ mm). The cutting conditions ($\Omega_{\text{spindle}} = 18,000$ rpm, feed per tooth 0.2 mm) are chosen according to the tool manufacturer recommendations. The machined specimen is then measured with a chromatic confocal Micromasure station.

Simulation parameters are chosen in order to generate deviations with a magnitude lower than the measurement noise and that is, therefore, studied. Hence, considering the tool radius of 5 mm, the angular step $d\alpha = 0.2^\circ$ generates a chordal deviation δ under 10 nm (Eq. 11). As the linear interpolation of the trajectory is based on this parameter ($d\alpha$),

it does not add additional geometrical error on the surface topography.

$$\delta = R \cdot (1 - \cos(\frac{\alpha}{2})) \quad (11)$$

4 Results and discussion

Results of the measurement and of the simulation are displayed in Fig. 7. To highlight the contributions of the proposed method, a surface compound of spherical caps is added. This surface is computed according to the models proposed by Kim and Chu [14] and Quinsat et al. [19]. As it can be seen, the simulation using the measure tool profile appears to be a good estimation of the actual surface pattern (measured), although the amplitude of the peaks is slightly overestimated. Actually, if only the track of the sphere is considered (Fig. 7, right), the simulation lacks any of fine scale details evident on the measured surface.

The apparent improvement in the simulation achieved by using the measured tool profile is confirmed by considering the roughness parameters: relative area area-scale complexity. These standardized parameters [2] relate to the inclinations on the surface and account for the complexity of the surface shapes at different scales. In fact, the idea is to exploit the chaotic, or fractal, nature of the surface, in particular, that the apparent area of a surface depends on the scale of observation. In the area-scale analysis, the topography of the surface is tiled using triangular patches. At any particular considered scale, all the patches have the same area (defining the scale), and the relative area at the scale is the calculated area divided by the nominal area [1, 7, 22]. The calculated area is given by the number of patches at the considered scale multiplied by the area of the patch at

Fig. 7 3D obtained pattern (left-measured, middle simulation, right-sphere track)

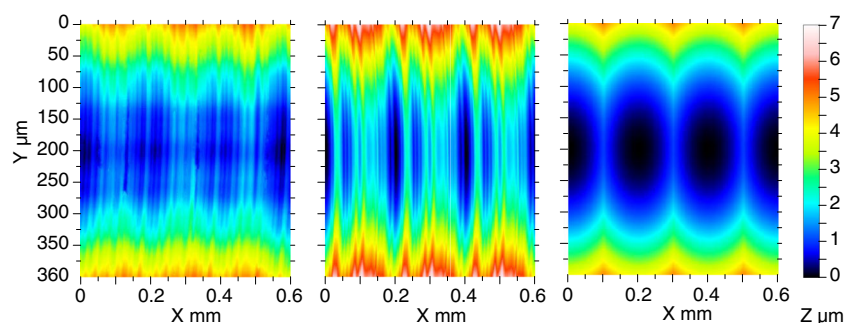
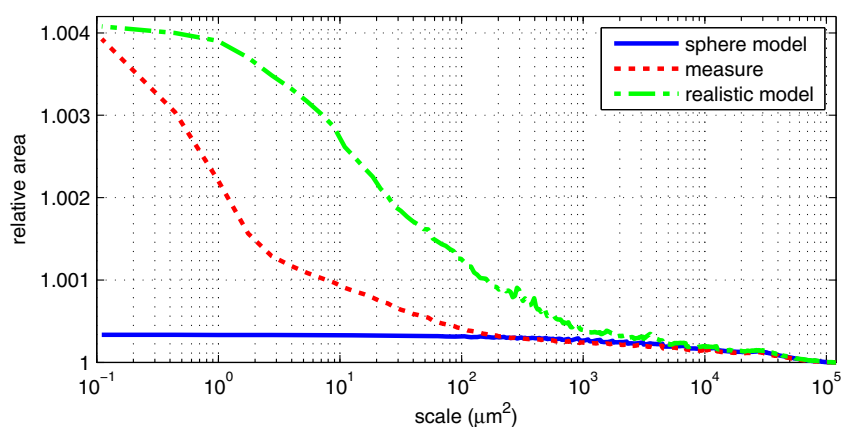


Fig. 8 Relative area vs scale

the scale. The area-scale complexity is the slope of the relative area plot. It can be calculated between any two scales where the tiling is performed. If the surfaces can be considered multi-fractal with respect to scale, then this complexity is related to the fractal dimension [1]. These parameters, which were calculated using scale-sensitive fractal analysis [3], are displayed in Figs. 8 and 9. The relative area at different scales clearly highlights that the model based on the smooth sphere is not a good representation of the actual machined surface. At large scales, the simulation with the measured tool profile provides a better representation of the actual surface. On the other hand, at fine scales, the simulation leads to higher values of the relative area, which could be associated with the difference in the peak-to-valley magnitude previously observed. Actually, some effects, such as, abrasion and elastic strains of the material below the cutting edge present during the cutting process, are not taken into account in the simulation.

The complexity of the simulation based on the tool profile (realistic simulation) reaches a maximum at $24.68 \mu m^2$ and then declines sharply at finer scales. This could be because of the refinement of the mesh to a linear

scale of about $7 \mu m$, which corresponds to the leg of a triangle with an area of about $24.5 \mu m^2$. The complexity of the measured surface drops sharply at scales below $1 \mu m^2$, corresponding to linear scales of about the square root of two. As the value of the diameter spot is equal to $2 \mu m$, the complexity falls at small scales. Once more, the topography model based on the smooth spherical tool (spherical caps) has a complexity that is as much as two orders of magnitude below the measured topography.

This remark is confirmed by conventional roughness parameter evaluation (Table 3). To only consider conventional roughness characterization parameters, the surfaces are filtered using a Gaussian filter ($\lambda_{\text{cutoff}} = 0.08 \text{ mm}$). Results clearly highlight a better agreement of the value of the conventional characterization parameters obtained using the realistic simulation with those obtained by measurement. The simulation with only spherical caps is not sufficient to account for fine-scale surface topography. Therefore, the simulation gives a good estimation of the surface roughness that could be used to link surface integrity with the fatigue-life of the part.

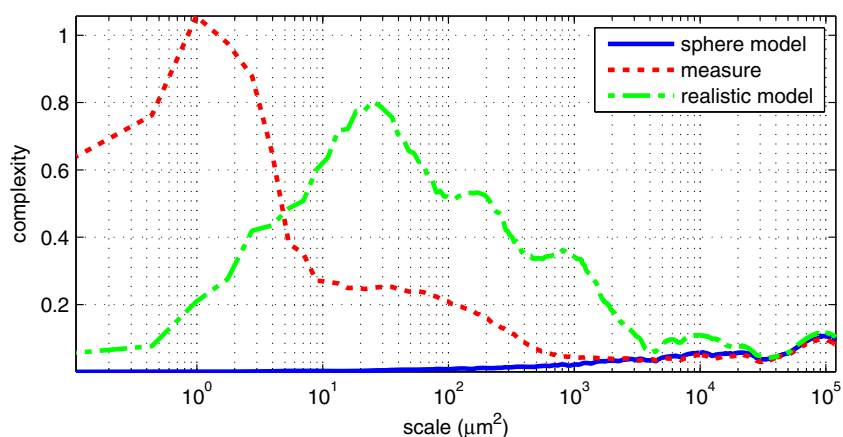
Fig. 9 Complexity vs scale

Table 3 Amplitude roughness parameters [2]

	$S_q (\mu m)$	S_{sk}	S_{ku}	$S_p (\mu m)$	$S_v (\mu m)$	$S_z (\mu m)$	$S_a (\mu m)$
Measured	0.158	-0.0281	2.85	0.515	0.825	1.34	0.127
Realistic simulation	0.326	0.488	2.90	0.855	0.611	1.47	0.258
Spherical caps	0.0257	2.34	7.64	0.105	0.0153	0.120	0.0177

5 Conclusion

In the paper, an algorithm for a more realistic simulation of surface formation is proposed. This simulation relies on the well-known Z-buffer method for which a tool cuts a set of vertical spikes representing the part surface. To account for the real tool geometry, the tool cutting edge is measured using an optical means that gives a good representation of the actual edge. To assess the method, a steel workpiece is machined by three-axis ball-end milling. Comparisons between the 3D topography obtained by realistic simulation to the measured one highlights that the simulation leads to a better estimation of the topography than does a simulation with a smooth tool. In particular, the multi-scale study of the relative area clearly shows that the simulation provides a better representation of the topography than a smooth, sphere-cap tool model. This gives a good estimation of the motif left on the part surface for a scale that can be useful to study the link between surface integrity and fatigue-life. However, the surface complexity obtained by simulation is lower than that obtained for the measured one likely due to calculation limits. A sensitive study of the effect of the tool meshing combined with the effect of the part meshing would give the adequate compromise calculation time/ quality of the representation. It would be interesting to complete the modeling by considering the mechanical behavior of the part under cutting forces. Accounting for the local part elasticity during tool cutting would likely lead to a better estimation of the peak magnitude.

References

- 2009 ASME B46.1: Surface texture (surface roughness, waviness, and lay). Revision of ASME B46.1-2002
- 2012 ISO 25178-2: Geometrical product specifications (GPS)—surface texture: areal—Part 2: terms, definitions and surface texture parameters. ICS : 17.040.20
- 2013 SFrax: surface metrology and fractal analysis. <http://www.surfract.com/>. Accessed 29 May 2014
- Antoniadis A, Savakis C, Bilalis N, Balouktsis A (2003) Prediction of surface topomorphy and roughness in ball-end milling. *Int J Adv Manuf Technol* 21(12):965–971. doi:10.1007/s00170-002-1418-8
- Arizmendi M, Fernández J, de Lacalle LL, Lamikiz A, Gil A, Sánchez J, Campa F, Veiga F (2008) Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. experimental validation. *CIRP Ann Manuf Technol* 57(1):101–104. doi:10.1016/j.cirp.2008.03.045
- Aurich J, Braun O, Warnecke G, Cronjäger L (2003) Development of a superabrasive grinding wheel with defined grain structure using kinematic simulation. *CIRP Ann Manuf Technol* 52(1):275–280. doi:10.1016/S0007-8506(07)60583-6
- Berglund J, Brown C, Rosén BG, Bay N (2010) Milled die steel surface roughness correlation with steel sheet friction. *CIRP Ann Manuf Technol* 59(1):577–580. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.140
- Bouzakis KD, Aichouh P, Efsthathiou K (2003) Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools. *Int J Mach Tools Manuf* 43(5):499–514. doi:10.1016/S0890-6955(02)00265-1
- Buj-Corral I, Vivancos-Calvet J (2012) Domínguez-Fernández A. *Int J Mach Tools Manuf* 53(1):151–159. doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.10.006
- Denkena B, Böß V, Nespor D, Samp A (2011) Kinematic and stochastic surface topography of machined TiAl6V4-parts by means of ball nose end milling. *Procedia Eng* 19(0):81–87. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.083. 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)
- Gao T, Zhang W, Qiu K, Wan M (2005) A new algorithm for the numerical simulation of machined surface topography in multiaxis ball-end milling. *J Manuf Sci Eng* 128(1):96–103. doi:10.1115/1.2123047
- Guillemot N, Lartigue C, Billardon R, Mawussi B (2010) Prediction of the endurance limit taking account of the microgeometry after finishing milling. *Int J Interact Des Manuf* 4(4):239–249. doi:10.1007/s12008-010-0104-6
- Inasaki I (1996) Grinding process simulation based on the wheel topography measurement. *CIRP Ann Manuf Technol* 45(1):347–350. doi:10.1016/S0007-8506(07)63077-7
- Kim B, Chu C (1999) Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method. *Comput Aided Des* 31(8):485–494. doi:10.1016/S0010-4485(99)00045-7
- Lavernhe S, Tournier C, Lartigue C (2008) Kinematical performance prediction in multi-axis machining for process planning optimization. *Int J Adv Manuf Technol* 37(5-6):534–544. doi:10.1007/s00170-007-1001-4
- Lavernhe S, Quinsat Y, Lartigue C (2010) Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling. *Int J Adv Manuf Technol* 51(9-12):915–924. doi:10.1007/s00170-010-2686-3
- Liu N, Loftus M, Whitten A (2005) Surface finish visualisation in high speed, ball nose milling applications. *Int J Mach Tools Manuf* 45(10):1152–1161. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.12.007
- Novovic D, Dewes R, Aspinwall D, Voice W, Bowen P (2004) The effect of machined topography and integrity on fatigue life. *Int J Mach Tools Manuf* 44(2 - 3):125–134. doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.10.018
- Quinsat Y, Sabourin L, Lartigue C (2008) Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness parameter. *J Mater Process Technol* 195(1 - 3):135–143. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.04.129
- Quinsat Y, Lavernhe S, Lartigue C (2011) Characterization of 3D surface topography in 5-axis milling. *Wear* 271(3 -

- 4):590–595. doi:[10.1016/j.wear.2010.05.014](https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.05.014). the 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces
21. Souto-Lebel A, Guillemot N, Lartigue C, Billardon R (2011) Characterization and influence of defect size distribution induced by ball-end finishing milling on fatigue life. *Procedia Eng* 19:343–348. doi:[10.1016/j.proeng.2011.11.123](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.123). 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)
22. Ungar PS, Brown CA, Bergstrom TS, Walker A (2003) Quantification of dental microwear by tandem scanning confocal microscopy and scale-sensitive fractal analyses. *Scan* 25(4):185–193. doi:[10.1002/sca.4950250405](https://doi.org/10.1002/sca.4950250405)
23. Zhang WH, Tan G, Wan M, Gao T, Bassir D (2008) A new algorithm for the numerical simulation of machined surface topography in multiaxis ball-end milling. *J Manuf Sci Eng* 003:1–11. doi:[10.1115/1.2815337](https://doi.org/10.1115/1.2815337)

**Y. Quinsat, C. Tournier, In situ
non-contact measurements of
surface roughness, Precision
Engineering, Vol. 36, pp. 97-103, 2012**



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

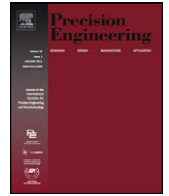
In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

Precision Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/precision

In situ non-contact measurements of surface roughness

Yann Quinsat, Christophe Tournier*

LURPA, ENS Cachan, Université Paris Sud 11, 61 av. du président Wilson, 94235 Cachan, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 December 2010

Received in revised form 21 July 2011

Accepted 28 July 2011

Available online 4 August 2011

Keywords:

In situ measurements

Non-contact sensor

3D surface roughness

Thermal compensation

Polishing

ABSTRACT

Surface roughness measurements are often required to validate a machining process. However, when using a 3D surface roughness measuring instruments it is usually necessary to remove the part from the machine tool between two operations, potentially introducing systematic errors. Furthermore, surface roughness measuring instruments are not suited for measuring heavy and large parts such as stamping dies. This paper presents a method to measure the surface topography of a part in situ, i.e. directly on the machine tool without removing the part. After introducing the sensor technology and the data acquisition chain, the effects of geometric imperfections of the machine tool and compensation for thermal effects on the measurement results are discussed. An application of the method is then presented to assess a finishing process on a five-axis machining centre including milling and polishing operations.

© 2011 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

The manufacturing of molds, dies and medical implants requires the use of finishing operations such as machining and polishing so as to achieve the required surface quality. Surface roughness controls are mandatory to define the process and validate the quality of the machined part. The difficulty lies in the fact that the use of measuring instruments dedicated to 3D surface roughness measurement is limited to small parts with single orientation. Furthermore, mounting and un-mounting the part leads to systematic errors and geometrical deviations. Thus our objective is to be able to control parts of any size without removing the part from the machine tool.

According to Vacharanukul and Mekid [1], measurement of a part can be performed on the machine tool during the machining process (in process measurement) or by interrupting the process and keeping the part in the part holder (in situ measurement). Different techniques can be used for in process and in situ measurements [1–3]. These techniques can be categorized into six methods: mechanical, optical, pneumatic, ultrasonic, electrical and temperature detection methods. Optical techniques are often used as they provide a good compromise between acquisitions speed and axial measurement resolution. However, in process measurement techniques must take into account the difficulties linked to the machine tool environment such as tool deflection, coolant, vibrations, etc. Grosvenor et al. [4] have investigated these difficulties within the context of in process measurement of diameter

in turning using proximity sensors. The in process measurement method proposed by Persson [5] is based on an optical sensor using scattered light. The sensor is fixed on a grinding machine to evaluate surface roughness during grinding operations. More recently [6] this kind of sensor has been used to conduct on-line measurement on a diamond turning lathe. The sensor is fixed on a grinding machine to evaluate surface roughness during grinding operations. This measurement method may also be enriched with hybrid vision system. Tian and Lu [7] have proposed to associate two digital cameras to measure laser speckle pattern and scattering images simultaneously. Lin et al. [8] and Jiang et al. [9] have investigated the feasibility of spatial light-wave scanning to replace mechanical stylus scanning for in situ surface roughness measurement. The developed sensor has been used for on-line nano scale surface measurement [10,11]. However, their work has focused on the development of the sensor regardless of the interactions between the sensor and the machine and the measurement range is not compatible with the considered application.

Therefore, our approach consists in using a non-contact optical sensor to achieve in situ measurement of surface roughness on a 5-axis milling center. According to [12], a confocal chromatic sensor has been chosen. This technology is the most adapted given the five axis milling environment constraints.

The sensor is part of a MICROMESURE 3D measuring system from STIL. It is a modular measurement system including a table unit, comprising motorized x, y, z stages on which an optical pen (measuring head) is mounted and connected to a controller through an optical fiber. Within the context of in situ measurement, the optical pen is mounted in the spindle of the machine tool with a dedicated set-up and a standard HSK 63A tool holder attachment.

* Corresponding author.

E-mail address: christophe.tournier@lurpa.ens-cachan.fr (C. Tournier).

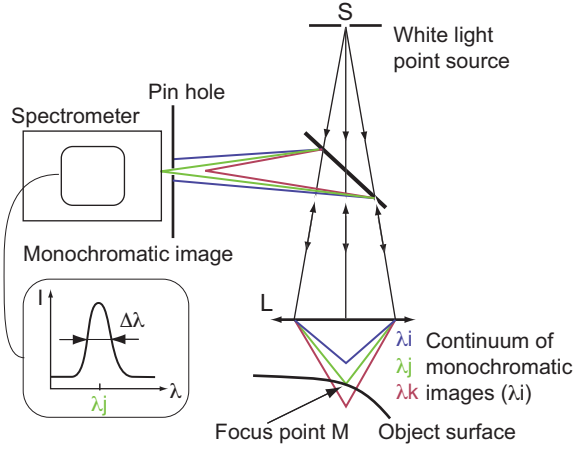


Fig. 1. Non-contact sensor description.

As the optical pen takes the place of the tool, this technique does not allow us to conduct in process measurements.

Thus, the geometrical imperfections of the machine tool must be taken into account and the thermal expansion of the spindle has to be compensated.

The paper is organized as follows: first the sensor and the acquisition system are presented in Section 2. Then in Section 3, the in situ geometrical error model is described as well as the identification of model parameters. Section 4 is dedicated to the measurement comparison between in situ and conventional measuring system techniques. Finally, a polishing process oriented application of in situ measurement is proposed in Section 5 before concluding remarks.

2. In situ measurement system

2.1. Non-contact sensor

The considered sensor to evaluate the surface topography is based on the chromatic confocal sensing technology from STIL [15] (Fig. 1). A chromatic lens L generates the image of a point white-light source as a continuum of monochromatic images. The backscattered light arrives at a pinhole P which filters out all wavelengths except a single wavelength, λ_j . The position of the focus point M is directly related to the detected wavelength λ_j .

Two different sensors have been used for our investigations. A sensor with a measuring range of 400 μm (22 nm of axial resolution), used in in situ or in the measuring instrument and a 100 μm measuring range (5 nm of axial resolution) sensor dedicated to the measuring instrument.

2.2. Measurement procedure

The optical sensor is mounted on the machine tool spindle using a dedicated mounting system (Fig. 2). Thus measurements are conducted along z axis, the theoretical spindle axis of the machine tool. The sensor is connected to its dedicated controller through an optical fiber. The signal provided by the controller is recorded with an in-house visual-basic based interface.

The measurement is performed by a succession of 2D profile measurements along scanning paths which are parallel to a plane passing through z axis, like xz plane or yz plane for instance. The positions of the measured points in the xy plane are not monitored but computed according to the distance between scanning path and the programmed sensor displacement velocity.

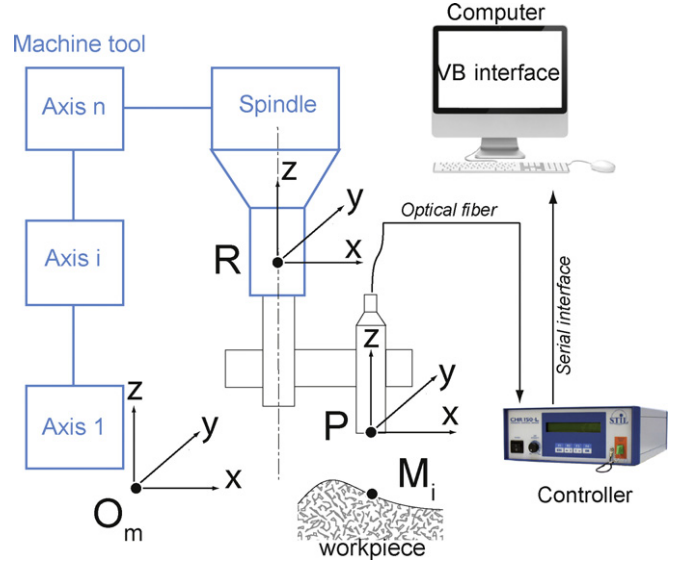


Fig. 2. Measurement devices and data acquisition.

2.3. Measurement geometrical modeling

As the machine tool and the system on which the sensor is mounted may present geometrical deviations, a geometrical model is proposed in order to investigate the potential source of errors. Characteristic points of the assembly are presented (Fig. 2) as well as the transformation matrices which model geometrical deviations.

- O_m : Origin of the machine tool measure coordinate system.
- R : Characteristic point of the tool holder attachment, defined as the Reference point.
- P : Origin of the optical pen measurement.
- M_i : Measured point.
- R_{Om} : Machine tool measure coordinate system.
- R_{Rm} : Spindle coordinate system.

$$M_{R_{Om}R_{Rm}} = \begin{pmatrix} X \\ I_3 & Y \\ Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

- $R_{Rm\delta}$: Spindle coordinate system including machine tool geometrical deviations (straightness, squareness).

$$M_{R_{Rm}R_{Rm\delta}} = \begin{pmatrix} R_1(\psi_1, \theta_1, \phi_1) & dX \\ dY \\ dZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

- $R_{Rm\Delta}$: Spindle coordinate system including machine tool geometrical deviations and thermal expansion.

$$M_{R_{Rm\delta}R_{Rm\Delta}} = \begin{pmatrix} R_2(\psi_2, \theta_2, \phi_2) & \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

- R_{Pmes} : Optical pen coordinate system.

$$M_{R_{Rm\Delta}R_{Pmes}} = \begin{pmatrix} R_3(\psi_3, \theta_3, \phi_3) & a \\ b \\ c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

The coordinates of the point M_i in R_{Pmes} are:

$$M_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \\ 1 \end{pmatrix}_{R_{Pmes}} \quad (5)$$

$(0, 0, h, 1)$, h being the distance measured by the sensor.

- First assumption: Considering the small range of displacement during measurements, it has been stated that:

$$R_1(\psi_1, \theta_1, \phi_1) = I_3 \text{ and } dX = dY = dZ = 0$$

This assumption amounts to considering that the axes straightness is perfect along the small displacement. It is also assumed that the axes squareness is a second order error compared to the thermal deviation.

- Second assumption: measurement duration is supposed to be short compared to the thermal inertia of the machine tool structure. The thermal expansion of the spindle due to its cooling system is considered to be more significant. Spindle expansions leading to small rotations and expansions in the x and y directions are neglected:

$$R_2(\psi_2, \theta_2, \phi_2) = I_3 \text{ and } \delta X = \delta Y = 0$$

- Third assumption: the pen sensor is supposed to be collinear to the spindle axis which leads to state that:

$$R_3(\psi_3, \theta_3, \phi_3) = I_3$$

This hypothesis consists in neglecting the altitude measurement error (cosine error) which is a second order error.

These assumptions also mean that the position of the measured point in the xy plane remains unknown. However, the distance between two measurement lines is constant. This should have small consequences on the 3D roughness parameter values. This point is validated in Section 4.

Then, the coordinates of the point M_i in R_{Om} are the following:

$$M_i = \begin{pmatrix} X + a \\ Y + b \\ Z + \delta Z + c + h \\ 1 \end{pmatrix}_{R_{Om}} \quad (6)$$

3. Model identification

The model outlined above is only a geometrical model. The term δZ corresponding to the spindle expansion and the z axis repeatability of the machine tool needs to be identified.

3.1. Thermal behavior

The machine tool spindle is cooled by an air conditioning system so as to maintain a limited operating temperature. Thus, expansions of the spindle are contained in a range proportional to the temperature variation of the coolant ($20^\circ\text{C} \pm 1$). As these expansions have an impact on the in situ measurement, they need to be known. In order to take into account the existence of measurement variations due to thermal expansion, the same point on a polished surface has been measured without moving the sensor during 100 min. The acquisition frequency of measurements was set to 1 kHz (Fig. 3).

In parallel, the cooling cycle of the spindle has been recorded in order to establish a compensation model for measuring defects. Temperature variations of the coolant, of the nose of the spindle

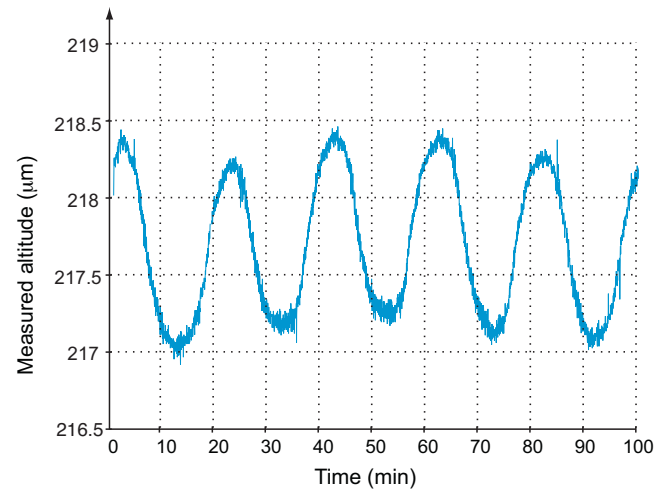


Fig. 3. Measurement of a given point during 100 min.

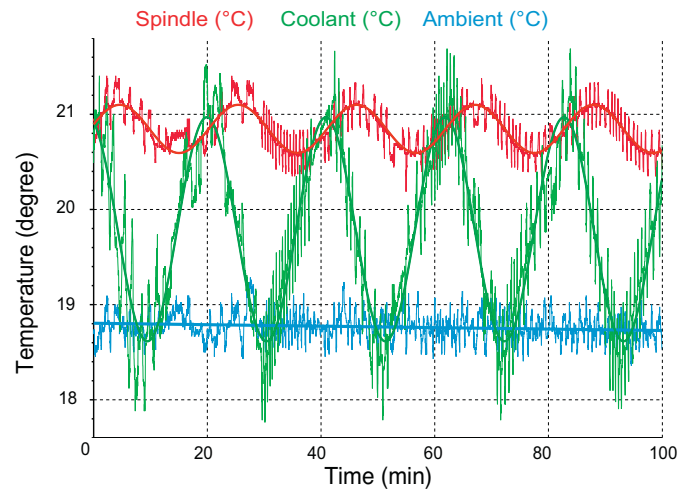


Fig. 4. Temperatures monitoring.

as well as the ambient temperature have been recorded during the measurement (Fig. 4).

Variations obtained during the measurement period clearly show the cyclical nature of the thermal behavior. As every first order system, temperature is following cycles of exponential functions, but in order to simplify the data interpolation, a sinusoidal model has been chosen $T(t)$:

$$T(t) = A \cdot \sin(B \cdot t + C) + D \quad (7)$$

Sinusoidal functions associated with the two evolution curves of the fluid temperature and of the spindle are defined in Table 1.

The frequency B of the two curves is identical and corresponds to a period of 20 min. A phase shift between the two curves due to heat transfer by conduction is also observed. With these curves, the thermal effects due to cooling cycle can be compensated. The thermal effects compensation allows us to conduct a study on the influence of the repeatability of the machine tool.

Table 1
Thermal behavior.

	A	B	C	D
Coolant	0.2531	0.301	0.1876	20.85
Spindle	1.177	0.300	0.1877	19.79

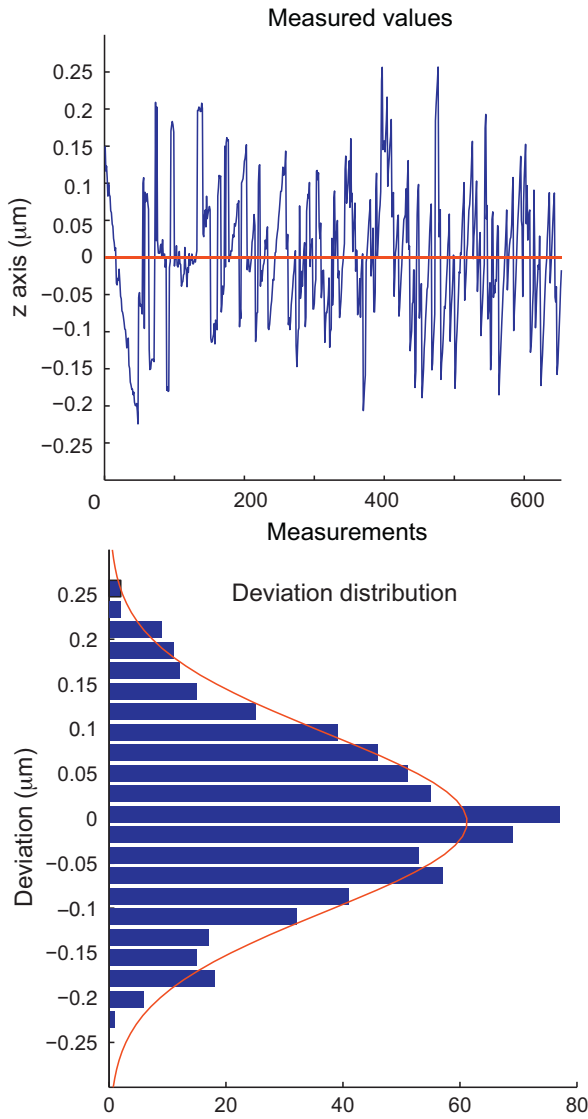


Fig. 5. Z-axis repeatability (point M_1).

3.2. Z-axis repeatability study

The purpose of this section is to determine the influence of the z axis repeatability of positioning on measurement results. According to ISO 230-2 [13], a series of measurements of three points M_i in three different locations of the z axis (spaced 100 mm) has been conducted. Each point has been measured 650 times. For each measurement m_{ij} , the measurement frequency is fixed to 1 kHz for a period of 4 s. The measurement cycle is thus composed of a slow approach (20 mm/min) over a 1 mm downward displacement along z axis, the measurement, and a fast retract (200 mm/min).

After the compensation of the thermal effect, measured values z_{ij} are normally distributed (Fig. 5) and the estimators of standard uncertainty in the downward direction $s_{i\downarrow}$ are equal to 0.0704 μm , 0.1044 μm and 0.0714 μm . This leads to a repeatability of positioning R_{\downarrow} equal to 0.328 μm ($R_{\downarrow} = \max(4 \cdot s_{i\downarrow})$).

The conclusion of this study is that below 0.3 μm , measurement uncertainty becomes too important to evaluate geometrical deviations.

Table 2
Groove measurement results.

	Groove depth
In situ 22 nm sensor	$\bar{x} = 0.999 \mu\text{m}$
Instrument 22 nm sensor	$\bar{x} = 0.919 \mu\text{m}$
Instrument 5 nm sensor	$\bar{x} = 0.931 \mu\text{m}$

4. Model validation

The proposed measurement model (Eq. (6)) consists in neglecting most of the geometrical defects (assumptions 1, 2 and 3) of the machine tool. In order to validate the method and the measurement model, two parts have been measured with the same sensor on the machine tool and on the dedicated measuring system.

4.1. Single groove measurement

The first part to be measured presents a calibrated groove (1 μm depth, 100 μm width) on a polished plane (ISO 12179 type A artefact [14]). This calibrated groove has been chosen to validate the assumptions regarding the misalignment of the sensor compared to the z axis and the geometrical errors of the machine tool (straightness and squareness). Both sensors have been employed on the measuring system or in situ leading to three different measurement configurations. Groove measurement results are gathered in Table 2 and in Fig. 6. Values reported in Table 2 are computed in the central orange area of Fig. 6. It can be observed that the in situ measurement is very noisy compared to the others. The same artifacts are visible on both sides of the groove for 22 nm sensor due to sensor saturation, which could not be corrected on the used sensor. However, the groove depth result for in situ configuration fits to the calibrated depth. Furthermore, since the result for in situ measurement is consistent with the calibrated depth of the groove, the orientation of the optical pen is aligned with the z axis, which validates the assumptions leading to neglect the rotation matrices $R_i(\psi_i, \theta_i, \phi_i)$. It also shows that the measurement noise generated during machine tool displacement is normally distributed as there

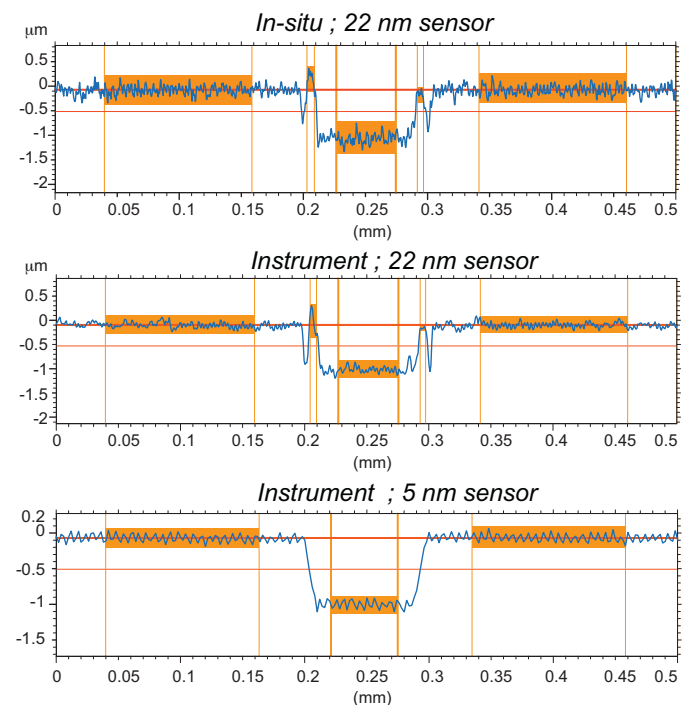


Fig. 6. Measured groove profiles.

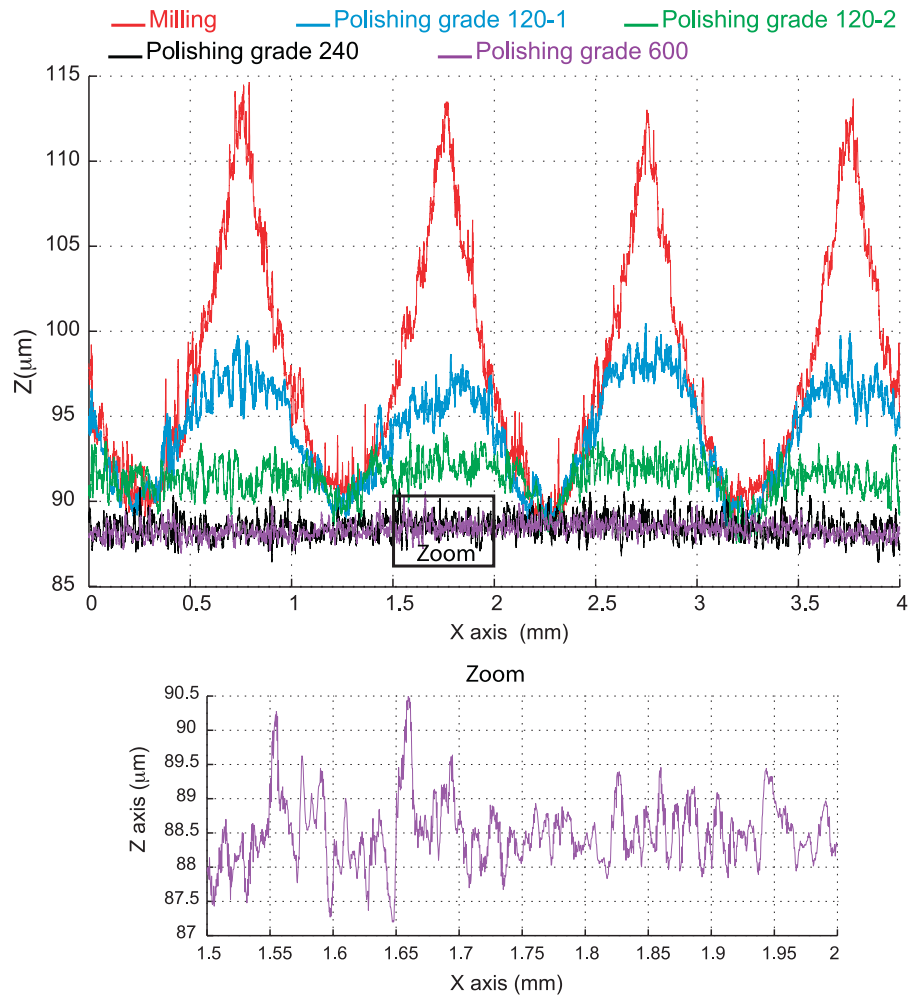


Fig. 7. In situ measurement 2D profiles.

is no significant slope. This is a first validation showing that the straightness deviations of the x and y axes are also insignificant.

4.2. Complex topography measurement

The surface belongs to a roughness sample presenting a certified 2D arithmetic roughness Ra equal to $2.97 \mu\text{m}$. It has been used to validate straightness along x and y axes ($dX=dY=0$) and thermal distortion along x and y axes ($\delta X=\delta Y=0$). The in situ measurement is compared to measuring instrument measurement through the evaluation of several roughness parameters, Ra , Sa and St [15] (Table 3). The first two parameters are mean parameters whilst the last one is a maximum value parameter. The error in the evaluation of Ra and Sa is about 10% and is probably due to the larger spot size of the 22 nm optical pen that produces a local averaging. Regarding the evaluation of St , results with the 22 nm sensor are twice as large as the result given by the 5 nm sensor. The higher resolution 5 nm sensor has a higher spatial resolution, seeing more details, leading to somewhat higher averaging parameters like Ra and Sa . The peak

parameter St becomes on the contrary smaller for the higher resolution sensor, because it produces fewer edge effects on the rough surface, which are evident on the groove profiles in Fig. 6.

It shows that it is possible to measure correctly complex topography although the measured point in the xy plane is never known

Table 3
Topography measurement results.

	Ra (μm)	Sa (μm)	St (μm)
In situ 22 nm	2.61	2.69	22.6
Instrument 22 nm	2.75	2.79	25.2
Instrument 5 nm	3.00	3.01	12.5

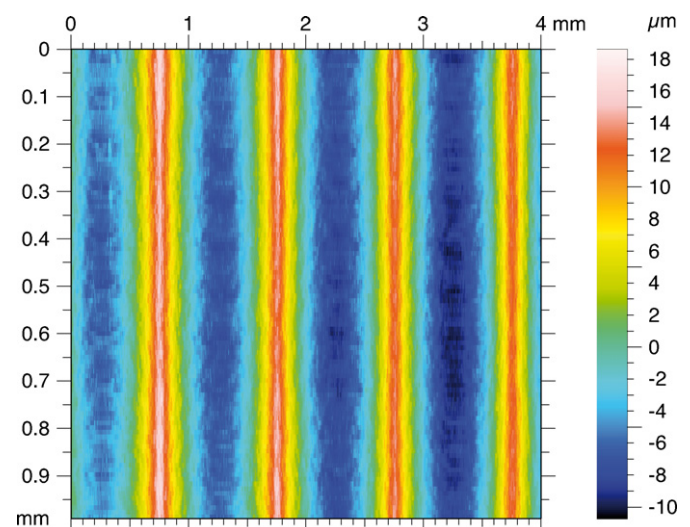


Fig. 8. In situ measurement; milling.

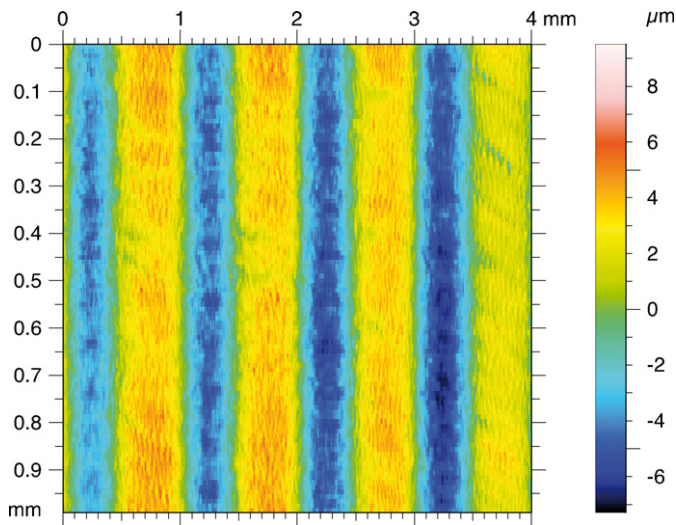


Fig. 9. In situ measurement; grade 120-1.

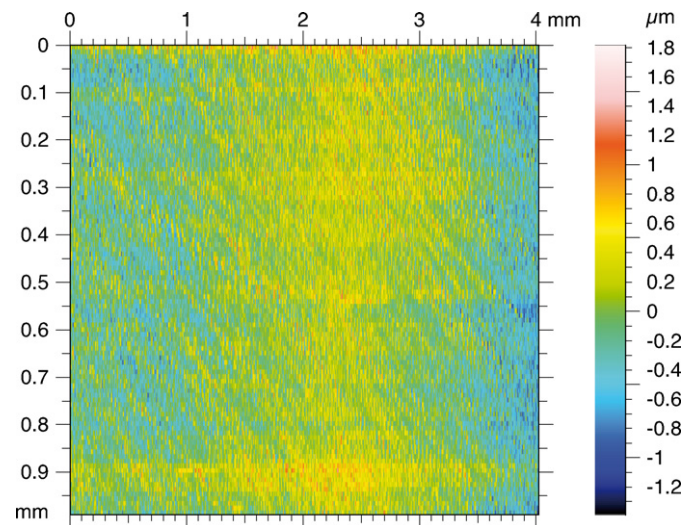


Fig. 12. In situ measurement; grade 600.

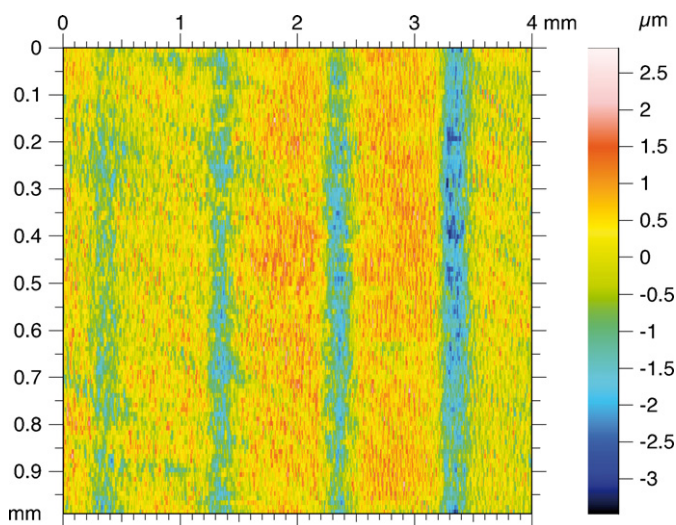


Fig. 10. In situ measurement; grade 120-2.

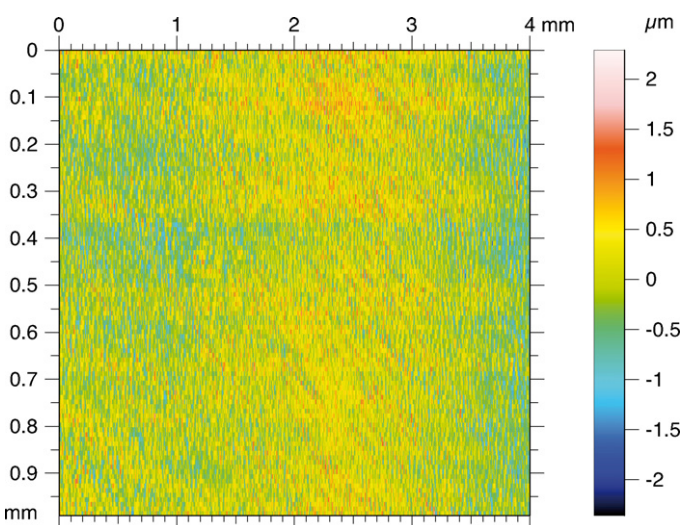


Fig. 11. In situ measurement; grade 240.

exactly. However, it seems that the machine tool does not introduce large straightness deviations compared to the measuring instrument. According to the results of the two sample measurements, the three assumptions stated in 2.3 seem to be validated for the application.

5. Application

The proposed application deals with the finishing operation of a plane surface. By using in situ measurement, it is possible to know when the surface roughness of the part has been reduced to the desirable level. The plane is machined in a 50 mm × 50 mm section block made of X38CrMoV5 steel. The part is machined on a 5-axis Mikron UCP710 machine tool to reach a milling finishing state before polishing. Three different grades of abrasive have been used for rough polishing operations (grade 120, 240 and 600). Abrasives are 18 mm diameter disks of silicon carbide pasted on the flexible support [16]. The polishing operations were carried out with a tilt angle of the tool in the feed direction equal to 10°. Surface roughness has been measured in situ after each of the five operations using the proposed method. Measurements have been carried out in a restricted area (4 mm × 1 mm) of the machined plane and with a scanning direction perpendicular to the tool path (Figs. 7–12).

Regarding the machining operation, the scallops generated by the ball-end tool are clearly visible. The removal of the scallops begins with the first abrasive tool (grade 120, path-1). After the second abrasive tool (grade 120, path-2), most of the scallops have disappeared and some valleys remain on the part. The grade 240 abrasive removes all the valleys and the amplitude of the geometrical deviations are close to 5 μm. The last abrasive paper (grade 600) generates smaller deviations (3 μm) as can be seen in the zoom area with some details of about 0.5 μm. Beyond this value, it may be difficult to distinguish the part roughness from the noise of the instrument.

6. Conclusion

The purpose of this paper was to introduce a method for measuring surface roughness in situ, i.e. on the machine without removing the part. A study of the thermal effects of the cooling cycle of the spindle on which the sensor is mounted enabled compensation of most of the effects due to thermal expansion. The results of different experiments show that the stability of the machine tool leads to the largest errors, especially regarding the repeatability. However,

it is quite possible to measure the evolution of surface roughness during milling and polishing operations in order to optimize the processes. Geometrical deviations down to $0.5\text{ }\mu\text{m}$ can be measured, which is approximately the limit that abrasive paper can reach before diamond paste polishing is required.

References

- [1] Vacharanukul K, Mekid S. In process dimensionnal inspection sensors. *Measurement* 2005;38(3):204–18.
- [2] Yandayan T, Burdekin M. In process dimensional measurement and control of workpiece accuracy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1997;37(10):1423–39.
- [3] Shiraishi M. Scope of in process measurement, monitoring and control techniques in machining processes. Part 2. Inprocess techniques for workpieces. *Precision Engineering* 1989;11(1):27–37.
- [4] Grosvenor RI, Kharpoutly C, Martin KF. In process measurement problems in machine tool applications. *International Journal of Production Research* 1991;29(2):357–74.
- [5] Persson U. In process measurement of surface roughness using light scattering. *Wear* 1998;215:1–2, :54–58.
- [6] Wang S, Tian Y, Tay CJ, Quan C. Development of a laser-scattering-based probe for on-line measurement of surface roughness. *Applied Optiques* 2003;42(7):1318–24.
- [7] Tian GY, Lu R-S. Hybrid vision system for online measurement of surface roughness. *Journal of Optical Society of America* 2006;23(12):3072–9.
- [8] Lin D, Jiang X, Xie F, Zhang W, Zhang L, Bennion I. High stability multiplexed fibre interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology. *Optics Express* 2004;23(12):5729–34.
- [9] Jiang X, Lin D, Blunt L, Zhang W, Zhang L. Investigation of some critical aspects of on-line surface measurement by a wavelength-division-multiplexing technique. *Measurement Science and Technology* 2006;17(3):483–7.
- [10] Wang K, Martin H, Jiang X. Jiang Actively stabilized optical fiber interferometry technique for online/in process surface measurement. *Review of Scientific Instruments* 2008;79(2). ISSN 0034-6748.
- [11] Yang S, Jiang X, Maxwell G, Wang K. An integrated optical coupler used in a fibre interferometry system for on-line surface measurements. *Optics Communications* 2008;281:1099–107.
- [12] Minoni U, Cavalli F. Surface quality control device for on-line applications. *Measurement* 2008;41:774–82.
- [13] ISO 230-2: 2006 Test code for machine tools. Part 2. Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes.
- [14] ISO 12179: 2000 Geometrical product specification (GPS) – surface texture: protocole method – calibration of contact (stylus) instruments.
- [15] Leach RK. In: *Fundamental principles of engineering nanometrology*. Elsevier; 2010.
- [16] Pessoles X, Tournier C. Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. *Journal of Materials Processing Technology* 2009;209(7):3665–73.

**Y. Quinsat, C. Lartigue, Filling holes
in digitized point cloud using a
morphing-based approach to
preserve volume characteristics,
International Journal of Advanced
Manufacturing Technology, Vol. 81,
pp. 411-421, 2015**

Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics

Yann Quinsat & Claire Iartigue

**The International Journal of
Advanced Manufacturing Technology**

ISSN 0268-3768

Int J Adv Manuf Technol
DOI 10.1007/s00170-015-7185-0



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer-Verlag London. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".

Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics

Yann Quinsat¹ · Claire Iartigue¹

Received: 9 December 2014 / Accepted: 19 April 2015
© Springer-Verlag London 2015

Abstract Filling holes is a major challenge to reduce digitizing time and makes the digitized model compatible with applications such as finite element (FE) analysis or inertia calculations. Indeed, whatever the sensor used, for accessibility reasons or reflection problems, some parts of the object may be non-measured defining digitizing holes in the digitized point cloud. In this paper, a method based on a mesh deformation is proposed to fill the digitized holes. The proposed method relies on the a priori knowledge of the numerical model as a nominal mesh. After identifying the digitized holes and calculating the differences between the nominal mesh and the point cloud, a deformation of the nominal mesh is performed. This deformation is determined by minimizing the energy of deformation of the mesh considered as a lattice. The proposed method is validated on a complex shape. Finally, this method is applied to an industrial part in order to highlight interest for balancing issues.

Keywords Digitalization · Energy minimisation · Holes filling · Shape preservation

1 Introduction

Various types of digitizing systems exist to acquire the shapes of a 3D object. Whatever the sensor used, laser plane,

structured light or stereo-vision, optical systems allow the acquisition of a great amount of points representative of the part surfaces in a very short time. Researches now focus on using optical measuring systems for in-line production measurements for which measuring time is a critical issue. However, it is commonly admitted that digitized point clouds are noisy, dense, and heterogeneous [14], and that for accessibility reasons or reflection problems, some parts of the object may be non-measured defining digitizing holes in the point cloud Fig. 1. Holes in the object representation could make further applications, such as rapid prototyping [7], Finite element analysis (FEA), or volume calculations difficult to achieve [21, 26]. These holes also contribute to increase the freeform surfaces reconstruction time, which is already a time-consuming operation [2]. Numerous studies [6, 13, 14, 18] deal with the definition of automated measuring strategies with the objective of time minimization while increasing the point cloud completeness, but re-digitizing is generally time-consuming and sometimes incompatible with in-process measurements. Furthermore, some zones could remain inaccessible. Some authors propose to reach the complete 3D object representation by filling the holes [15, 21]. Because of the variety of hole types, a large number of hole-filling algorithms exist, each one more or less dedicated to one specific type [20].

In this study, we use the a priori knowledge of the CAD model of the object under study to overcome the digitizing defects. The algorithm relies on a stress-strain deformation of the nominal geometry performed with the aim of minimizing the differences between the CAD model geometry and the point cloud while preserving the initial topology. It will thus be possible to fill the holes with the deformed geometry. This approach is interesting as it preserves the quality of the identified geometrical characteristics and of the measured dimensions of the object. It is appropriated

✉ Yann Quinsat
yann.quinsat@lurpa.ens-cachan.fr

¹ LURPA, ENS Cachan, Université Paris-Sud,
61 avenue du président Wilson,
F94235 Cachan, France

when the point exploitation requires a complete representation of the object as for FEA, or volume calculation as it is the case in the present paper. In fact, the approach is applied to inertia calculation, first step in crankshaft balancing. As crankshafts are complex parts, some surfaces are difficult to measured, and the digitizing process generally leads to incomplete point cloud presenting digitizing holes. Inertia calculation can only be performed if the discrete data structure is closed. This is performed by filling the holes using the morphing-based approach.

1.1 Related works

Methods for hole-filling generally consist of two sub-problems: hole detection and reconstruction of the missing regions [19]. The method proposed by Wang and Oliveira is well-adapted to scanned data. First, a mesh is associated to the point cloud. The boundaries of the holes are detected by identifying the boundary edges (edge belonging to only one triangle). A ring of points around the boundary, defining the boundary vicinity, is used to interpolate the missing portion using a Moving Least Squares procedure. Reconstructed patches preserve and smoothly blend with the original model.

Jun [9] bases his approach on the simple principle that a hole can be filled with planar triangulation (such as Delaunay triangulation) if all the boundary edges are projected onto a plane without auto-intersections. As this only works well for simple holes, complex holes are divided into several simple sub-holes that can be filled using the aforementioned method. In a final step, smoothing is applied to refine the model quality. Li et al. [12] propose to first identify feature curves, then use curve blending to complete the missing parts of the feature curves in the holes. A Bézier-Lagrange

hybrid patch relying on the feature curve is then constructed to fill the holes. The method preserves the features but is not completely automated. In their approach, Wang et al. [21] define a method well-adapted to restoring missing curves and corners. Missing feature curves (sharp edges) are reconstructed as B-spline curves. Missing corners are found by minimizing the square of the tetrahedron's volume reconstructed from the potential corner and its neighbors. Holes are thus filled using advancing front method. This method is less adapted to complex surfaces. Wang and Hung [20] propose a method based on Grey System Theory to achieve a smooth and continuous hole filling. Grey system theory is used to reduce randomness and increase regularity in the data. A prediction model is used to identify the location of the future element. In their approach, authors consider two prediction models: the normal vector prediction and the angle prediction. Once newly points are added, a final smoothing stage is performed but curvature is not controlled. Some authors take advantage of 2D images that have been acquired during the measurement stage to recover the missing zones [15, 17]. The 2D images are used as a set of constraints, and as input of a mesh deformation process which tends to minimize the curvature evolution between the inserted facets and the initial mesh. The mesh deformation relies on a mechanical approach for which the mesh is considered as a bar network. With such an approach, that combines techniques of shape from shading and mesh deformation, the overall shape of the part is preserved. However, it requires the use of two measuring systems at the same time. Some authors use morphing to reconstruct missing data with a specific application in dental surface reconstruction. The objective is to align a scanned tooth to a standard model. The approach begins with a one-to-one mapping of feature points of the standard tooth and the scanned tooth thanks to a radial basis function to define the relations for all points in both teeth. A global deformation (translation, rotation, and scaling) is performed followed by local adjustments to align the tooth in preparation to the standard one [23]. In this method, the use of morphing permits to fill the holes by taking advantages of the prior knowledge of the general tooth shape. Morphing is more used in computer graphics for mesh deformation. Two main kinds of approaches exist: the geometric methods and the physically based methods [24]. As far as geometric methods are concerned, lattice or mesh nodes are moved according to geometric constraints to achieve the deformation. In [8], the objective is to relate a template to a target geometry considering some reference points referred to as landmarks. After a general alignment of the landmarks, using translation, rotation, and scaling, the morphing is performed using the landmarks as constraints. The motion of the mesh nodes is interpolated from the motion of the landmarks based on a radial basis function regression to preserve smoothness. The

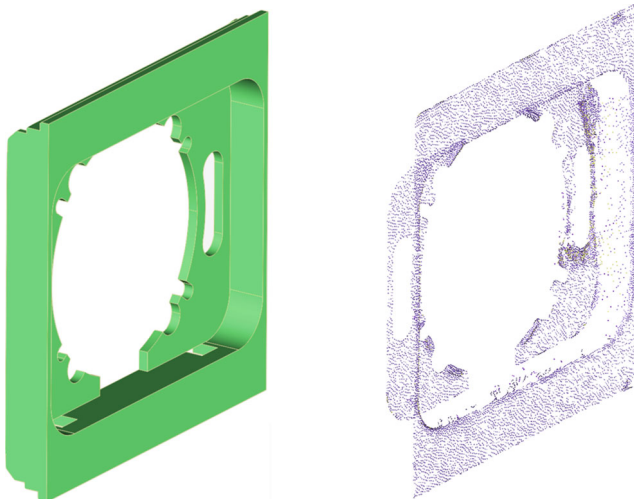


Fig. 1 Digitized holes

method is applied for human-femur reconstruction. In some cases, the morphing can be restrained to a region of interest while preserving the general shape. Kho and Garland [10] propose an iterative sketch-based deformation. The user draws a reference curve in a zone of interest and a second target curve. The deformation is achieved by deforming the reference curve toward the target one. These methods are generally more suited to visualization and animation.

Physically based approaches lead to more realistic results as they rely on energy minimization [5, 15, 17, 24]. As for geometric methods, the 3D object is represented as a triangular mesh, but the deformation is made here considering mechanical energy. Most methods only consider the stretching energy which accounts for length changes and add constraints to preserve the curvature evolution. In our approach, all types of mechanical energy are taken into account: stretching, bending, and torsion energy. Stretching corresponds to length changes, while bending and torsion ensure the overall shape preservation and continuity in curvature evolution.

1.2 Method overview

In this study, the proposed method for hole-filling considers the deformation of the object's CAD model to best approximate the scanned data. The CAD model is represented as a triangular mesh (STL format) (Fig. 2), for which $\{N\}$ is the set of nodes and $\{P\}$ the set of beams defining the triangular facets of the mesh. The mesh deformation is performed according to a physically-based approach based on energy minimization. To preserve curvature continuity, all types of solicitations are considered here: torsion, bending, and stretching.

The big picture of the method proposed to deform the mesh of the nominal part toward the measured data is displayed in Fig. 3. First, a registration step is required to globally align the mesh onto the scanned data. Indeed, to identify holes and perform a deformation that preserves the part shape, a good match between the measured and the nominal features is necessary. To make this registration, numerous methods exist [4, 22, 25], more generally

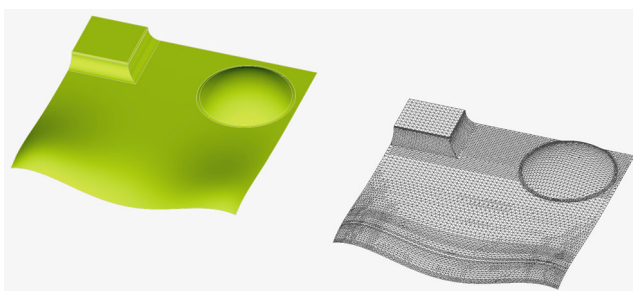


Fig. 2 Surface modeling

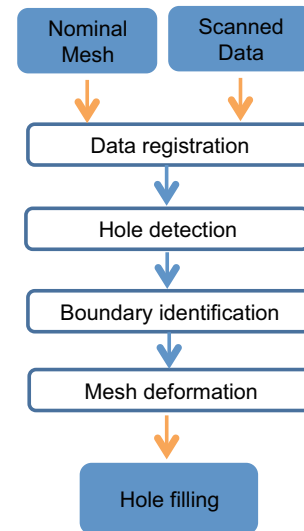


Fig. 3 Proposed approach

based on the well-known ICP algorithm [3]. In the present study, the HT-ICP algorithm is adopted. The second and the third steps focus on hole detection and boundary identification. Indeed, boundaries limit the zones for which the deformation will be performed. The last step is the mesh deformation based on stress-strain energy minimization. The energy minimization relies on a mechanical modeling which is detailed in the next section.

2 Mechanical modeling for energy minimization

The CAD model is represented as a triangular mesh. Each edge defining a facet is considered as a cylindrical beam which is characterized by its length L and its circular section S . The mechanical characteristics are defined by (E, G, I, Io) , respectively, the Young's modulus, the torsional modulus, the second moment, and the polar second moment (Table 1).

2.1 Settings

Let us consider the set of m beams $\{P^k\}_{[1,m]}$ and the set of n nodes $\{N_i\}_{[1,n]}$ defining beam's extremities. The displacement of each node is defined by six components, three accounting for the translation (u_i, v_i, w_i) and three

Table 1 Degree of freedom (DOF) description

	DOF	Characteristics
Tension	u	$E.S$
Torsion	α	$G.Io$
Bending in plane (X,Y)	v et β	$E.I$
Bending in plane (X,Z)	w et γ	$E.I$

others for the rotation ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$). Data can be expressed in the global frame \mathcal{R} as well as in the local frame \mathcal{R}^k associated to the beam k (Fig. 4). Hence, the following parameters can be defined:

- U_i^k : Node i displacement in the local frame \mathcal{R}^k .

$$U_i^k = [u_i^k \ v_i^k \ w_i^k \ \alpha_i^k \ \beta_i^k \ \gamma_i^k]^t_{\mathcal{R}^k}. \quad (1)$$

- U_i : Node i displacement in the global frame \mathcal{R} .
- $F_{(k,i)}^k$: External force applied to the beam k at the node i in the local frame.
- $F_{(k,i)}$: External force applied to the beam k at the node i in the global frame.

Each beam k is assumed to be axisymmetric and is defined by its mechanical (E^k, G^k) and geometrical (S_k, L_k, I_k, I_{o_k}) characteristics. The lattice deformation is completely defined by the global force, $F = [F_1 \ \dots \ F_m]^t$ and the node displacement $U = [U_1 \ \dots \ U_m]^t$ expressed in the global frame \mathcal{R} .

2.2 Stiffness matrix definition

For simplification reasons, we introduce the total force $\hat{F}_k^k = [F_{(k,i)}^k \ F_{(k,j)}^k]^t$ applied to the beam k at each extremity and the displacement $\hat{U}_k^k = [U_i^k \ U_j^k]^t$ of each beam extremity. Hence, the local stiffness matrix of the beam k is defined such as $\hat{F}_k^k = K_k^k \cdot \hat{U}_k^k$ with:

$$K_k^k = \begin{bmatrix} A_k^k & C_k^k \\ (C_k^k)^t & B_k^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

where the components of A_k^k , C_k^k , and B_k^k calculated by Euler Bernoulli beam theory are given in Appendix A. The

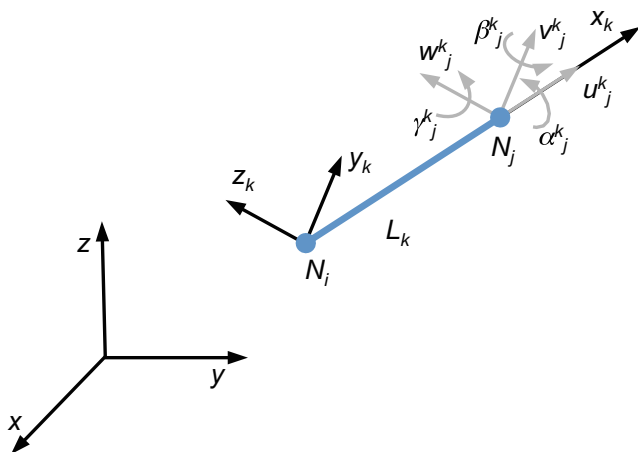


Fig. 4 Beam modeling

transformation from the global frame \mathcal{R} to the local frame \mathcal{R}^k of the beam k can be expressed thanks to the Euler's angles θ_k and ϕ_k giving the matrix $M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} = R_y(\frac{\pi}{2} - \phi_k) \cdot R_z(\theta_k)$ (Fig. 5). The external forces and the displacement can be easily expressed in the global frame by $U_i = M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* \cdot U_i^k$ and $F_{(k,i)} = M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* \cdot F_i^k$ with :

$$M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* = \begin{bmatrix} M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} & 0 \\ 0 & M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

It is thus possible to define the stiffness matrix in the global frame to calculate the relationship $\hat{F}_k = K_k \cdot \hat{U}_k$:

$$K_k = \begin{bmatrix} M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* & 0 \\ 0 & M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^* \end{bmatrix} \cdot K_k^k \cdot \begin{bmatrix} (M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^*)^t & 0 \\ 0 & (M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k}^*)^t \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 Energy balance

For each beam k , the deformation energy is defined by $E_k^{def} = \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_k^t \cdot K_k \cdot \hat{U}_k$. Hence the total energy of deformation is defined by:

$$E_{tot}^{def} = \sum_{k \in [1, n]} \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_k^t \cdot K_k \cdot \hat{U}_k \quad (5)$$

The global stiffness matrix K is calculated by assembling all the stiffness matrices. Therefore, the total energy of deformation becomes:

$$E_{tot}^{def} = \frac{1}{2} \cdot U^t \cdot K \cdot U \quad (6)$$

The solution of the deformation problem consists in the minimization of the total energy. In our case, as the external forces are null the mechanical work $W^{ext} = U^t \cdot F$, so the solution that minimizes the strain energy is the one that minimizes the energy of deformation. The resolution of such a problem is a classic quadratic optimization problem which is solved using Matlab.

The mesh deformation is performed by imposing displacements to the mesh nodes that do not correspond to

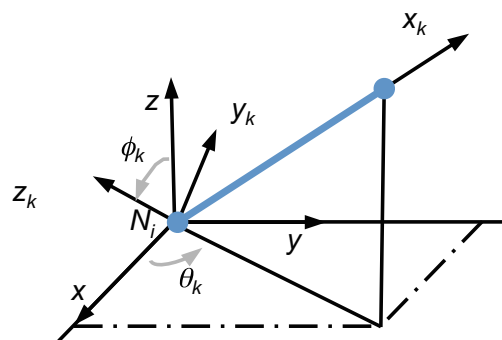


Fig. 5 Frame description

holes and by computing the displacement of the other nodes by minimization of the total energy E_{tot}^{def} . Let us remember here that each displacement includes three translations and three rotations. These 6 degrees of freedom involve both the shape preservation and the continuous evolution of the curvature. On the other hand, mesh deformation calculation can be time-consuming. Indeed, for a classical part (Fig. 2), the mesh includes about 10^5 nodes each having 6 degrees of freedom. The originality of our approach is thus to reduce the minimization problem to zones of interest defined from digitized hole neighborhoods. Finding the holes is thus an essential step in the overall approach as we will see now in more details.

3 General approach

The general approach consists of three main steps (Section 1.2): data registration, hole detection and boundary identification, and mesh deformation. The input data are a nominal mesh and a digitized point cloud corresponding to the scanned data. Finally, the nominal mesh is deformed to match the digitized point cloud which involves the hole filling.

3.1 Data registration

The first step of the approach is a global data registration between the scanned data and the nominal mesh to ensure the correspondence between scanned and nominal features. This step, necessarily performed prior to the mesh deformation enables the point cloud to be close to the nominal mesh. Global registration is achieved using a HT-ICP algorithm [4]. The result is considered satisfactory if the registration error is less than the error imputed to the manufacturing process and/or the digitizing error.

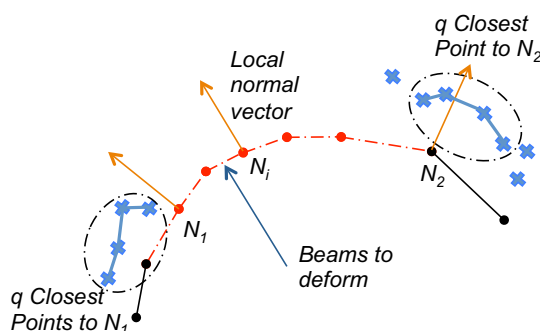


Fig. 6 Hole detection and mesh reduction

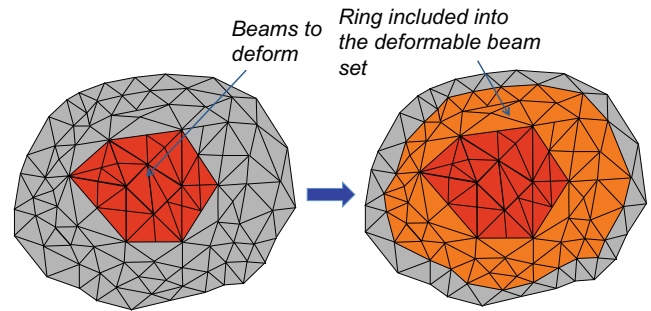


Fig. 7 Boundary definition

3.2 Hole detection and boundary detection

As point clouds obtained from scanning are generally dense and heterogeneous with a lack of continuity [14], finding digitizing holes could be a long and tedious task. To simplify this issue, we propose to take advantage of the initial data registration which leads to a good match between the scanned data and the nominal mesh. Holes are thus identified by considering points that belongs to the nominal mesh for which no equivalent exist in the point cloud.

The main hypothesis here is that the hole dimension is greater than the mesh size. Let us consider a point N of the nominal mesh, and its associated normal vector (Fig. 6). The q closest points to N belonging to the point cloud are identified. A local mesh is built from these q points, and the intersection between the line passing through N and directed along the normal vector is calculated. If the intersection does not exist, as for point N_1 in Fig. 6, the point N is identified as a *hole point*, and the beams linked to this node are classified as *beams to be deformed* (in red in Fig. 6). This hole detection method turns out to be efficient and simple to implement as it is based on the calculation of the vector normal. The facets linked with the considered point are selected, and the normal vector is estimated by calculating the average of the normal vectors of the previously

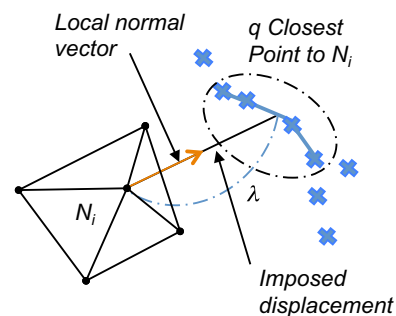


Fig. 8 Displacement computation

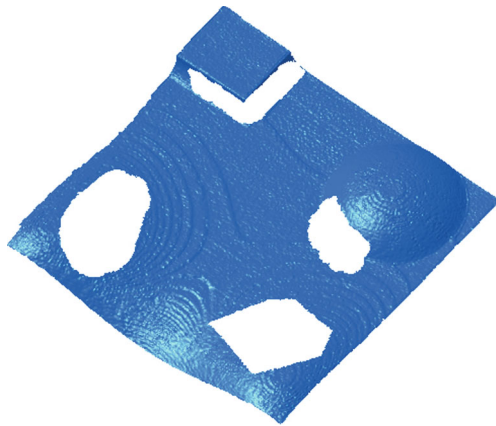


Fig. 9 Digitized point cloud with artificial holes

defined facets. Note that such a method involves the reduction of the mesh to be deformed to a restriction defined by the digitized holes.

3.3 Mesh deformation

To preserve the curvature evolution between the deformed regions and the nominal mesh, it seems relevant to increase the region to be deformed (Fig. 7). Therefore, a ring around the border is defined. The ring's width is defined according to the mesh's size; in this study, the width is equal to three times the mesh's size. The nodes of the nominal mesh that are added to the ring necessarily have their counterpart in the scanned point cloud. For such nodes, a corresponding point can be defined in the scanned point cloud by considering the barycentre of the q nearest points to the given node.

For each node belonging to the border zone (in orange in Fig. 7), the displacement \mathbf{u} is imposed and must

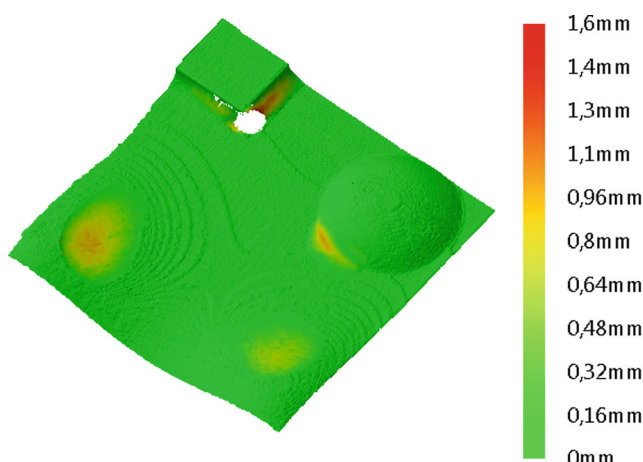


Fig. 10 Deviations between the CAD-filled mesh and the digitized point cloud

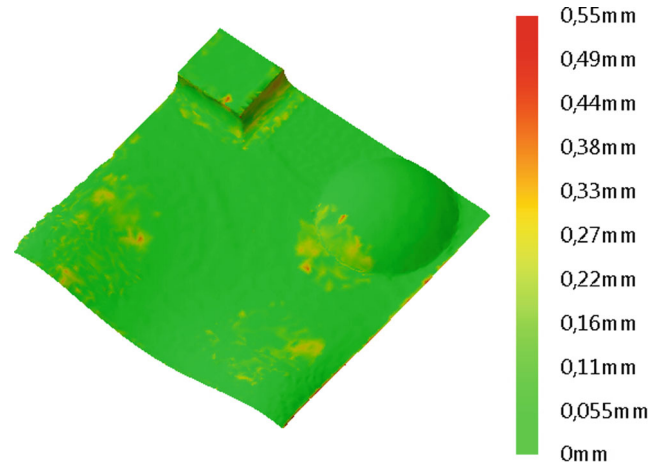


Fig. 11 Deviations between the morphed mesh and the digitized point cloud

be calculated. For such nodes, the intersection between the straight line passing through the point and directed along the vector normal and the mesh created by the q closest points exists (see Section 3.2). The displacement is the one that makes the studied node perfectly matched with its corresponding point: $\mathbf{u}_i = \lambda \cdot \mathbf{n}_i$ with \mathbf{n}_i the normal vector Fig. 8. This defines the generalized displacement of the node i in the global frame that is introduced in the energy minimization problem (Eq. 6):

$$U_i = [\lambda \cdot \mathbf{n}_{ix} \ \lambda \cdot \mathbf{n}_{iy} \ \lambda \cdot \mathbf{n}_{iz} \ 0 \ 0 \ 0]^T_{\mathcal{R}}. \quad (7)$$

For other points (in grey in Fig. 7), the displacement is used to reduce the gap between the nominal mesh and the measured points.

The minimization problem thus leads to the deformation of the nominal STL mesh to match the point cloud involving the propagation of the deformation to the digitized holes. Such an approach ensures the preservation of the general shape as the deformation is only applied to the zones of interest around the digitized holes. The management of the curvature continuity at the vicinity of the junction is done thanks to the control of the tree rotations at each node.

Table 2 Results analysis

	Cad filled	Morphing
Maximal deviation	1.6 mm	0.55 mm
Mean Deviation	0.0085 mm	0.044 mm
Standard Deviation	0.067 mm	0.073 mm

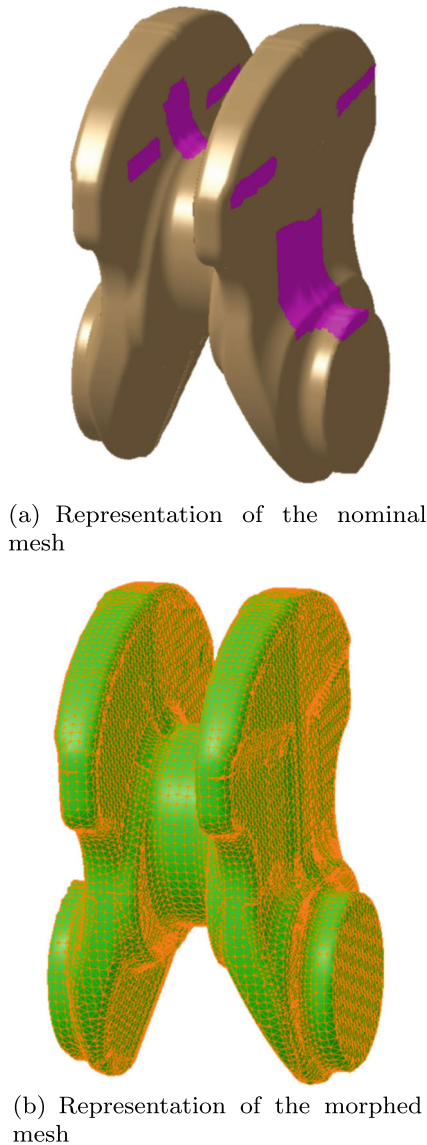


Fig. 12 Representation of the studied part

4 Application

4.1 Study of a sculptured part

The method is applied to a sculptured surface made by 3D printing (ABS plastic part) (Fig. 2) bounded by a $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$ box. The part is scanned using a laser scanner Kreon KZ25 mounted on a coordinate measuring machine (CMM). The manufacturer announces an accuracy of $15 \mu\text{m}$. Only one scanner orientation is used during the scanning process in order to reduce the digitizing noise. Under these conditions, the maximal digitizing

Table 3 Computation parameters

Number of nodes of initial mesh	12,718
Number of nodes of restricted mesh	2775
Number of nodes of the scanned mesh	545,007

noise is estimated to be $72 \mu\text{m}$ [1, 26]. After the scanning is done, artificial holes are added to the actual ones (Fig. 9). To assess our method, the holes are filled using a CAD software (CATIA ©) for which the mesh size is equivalent to that used in the nominal mesh. The mesh that is filled using the aforementioned CAD software is compared to the initial point cloud (Fig. 10). As shown in the figure, the CAD software does not succeed in hole filling as some holes remain unfilled. Furthermore, deviations with the initial mesh can reach up to 1.6 mm which can be penalizing for some applications. Lastly, one can see that curvature continuity is not ensured and so the overall shape is not preserved. The proposed morphing method is applied. Deviations between the morphed mesh and the measured point cloud are displayed in Fig. 11 and a comparison between the CAD-filling approach and our approach is proposed in Table 2. Since the distance between the scanned data and the CAD-filled mesh are identical outside the hole areas, the mean distance and the standard deviation are closed to those obtained with the morphing-based approach. However, the maximal distance is strongly reduced with our algorithm (three times lesser). Furthermore, Fig. 11 clearly highlights smoothing and overall shape preservation.

Nevertheless, high deviations can be observed on the edges of the part. This is likely due to the normal vector calculation, which is deficient when it comes to mesh edges for which there is a lack of information.

Let us see now, the interest of our algorithm for point exploitation, in the particular case of inertia parameter calculation for crankshaft balancing.

4.2 Improving crankshaft balancing

This illustration is directly linked with a new method for crankshaft balancing based on non-contact measurement. In this method, once the crankshaft is digitized using a laser-plane scanner, a STL mesh is directly built from the

Table 4 Unbalance in reference planes

Part	Unbalance 1 (g cm)	Unbalance 2 (g cm)
Nominal mesh	261.7	261.5
Morphing	258.9	258.3
Cad filled	253.9	253.8

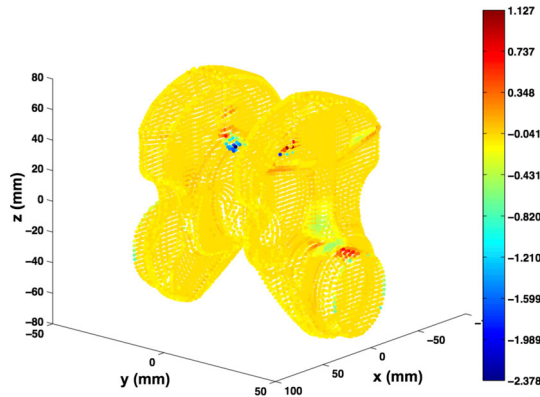


Fig. 13 Deviation (mm) between nominal and morphed crankshaft

digitized points. This mesh, which must define a closed structure, is the support for a voxelisation algorithm [16]. The voxelisation algorithm delivers a 3D structure of voxels, each one being assigned with an elementary mass. The calculation of inertia parameters is carried out considering this 3D structure made of concentrated masses located at the center of each voxel. This method has proven to be efficient for the estimation of the specific unbalances if the digitized point cloud is a complete representation of the shape [26]. Digitized holes can alter unbalance calculation. Indeed, crankshafts are very complex parts, which generally require numerous sensor orientations to access all the surfaces to be measured. As this process is time-consuming, the idea is to limit the number of sensor orientations, and to fill the holes with the morphing-based approach we propose.

For this purpose, the digitizing of the crankshaft is simulated from the CAD model. First, the defects of the manufacturing process are simulated so that the crankshaft has unbalance defects. Rough crankshafts are conventionally obtained by forging. Associated defects are simulated by performing an expansion of 3 % of the nominal CAD model and by carrying out a 0.5 mm shift between the two sections located on both sides of the symmetry plane. To

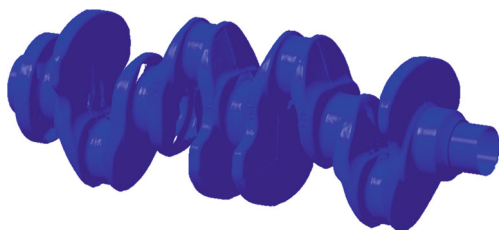


Fig. 14 Digitized crankshaft

simplify the representation, only a 100 mm portion of the crankshaft is studied (Fig. 12a). Mesh specifications are detailed in Table 3. These defects generate unbalances that are calculated in the two reference planes located on either extremity (Table 4).

Once the defects are simulated, the mesh is calculated from the modified CAD model. To simulate digitizing holes, holes are added to the mesh (represented in purple in Fig. 12a) corresponding to areas that are difficult to scan [26]. Our algorithm is thus applied. Results highlight a mean deviation of 8.7 μm and a standard deviation of 92 μm (Fig. 13). Unbalances are calculated for the morphed mesh. As displayed in Table 4, the values calculated after morphing are close to the actual values. Indeed, the estimated unbalances are determined with an error of less than 1.5 %. To enhance the efficiency of our approach, unbalances obtained using a classical CAD-filling are also calculated and compared to the actual ones. In this case, the error is up to 3 % which could be penalizing for the further balancing operation. Therefore, with the morphed-based approach to fill digitized holes, it is possible to preserve the overall shape of the digitized object, and then, it is also possible to conduct inertia calculations with an error of less than 1.5 % relatively to the actual values.

4.3 Application to digitized data

The method is applied to actual digitized data. The crankshaft is digitized using a structured light sensor (Gom Atos III) positioned thanks to a tripod. Under these conditions, the maximal digitizing noise is estimated at 18 μm [26]. From previous work [11], we know that 50 viewpoints are necessary to reach completeness. However, digitizing holes are present in the point cloud in non-accessible areas (Fig. 14). To clarify the representation, only the *arm* connecting the crankpin to the crank journal and one of the cylinders machined at both extremities are specifically studied (Figs. 15b and 16b).

The *arm* is bounded by a 85 x 40 x 110 mm³ box. According to the proposed method, the nominal mesh (Fig. 15a) is deformed, and the morphed mesh is displayed in Fig. 15c, d. Point identified as holes (Section 3.2) are represented in red, and points of the border used to impose displacements (Section 3.3) are represented in orange. Despite the complexity of the hole boundary (Fig. 15b) and of the digitizing noise, the mesh morphing leads to a satisfactory result as the shape is clearly preserved, along with the curvature evolution 15d. The morphed mesh can replace the point cloud for further point exploitation. This result highlights the performance of the method for filling actual digitized holes.

Regarding the second part, it consists of a 41 mm diameter and 19 mm length cylinder (Fig. 16a). In this case, the

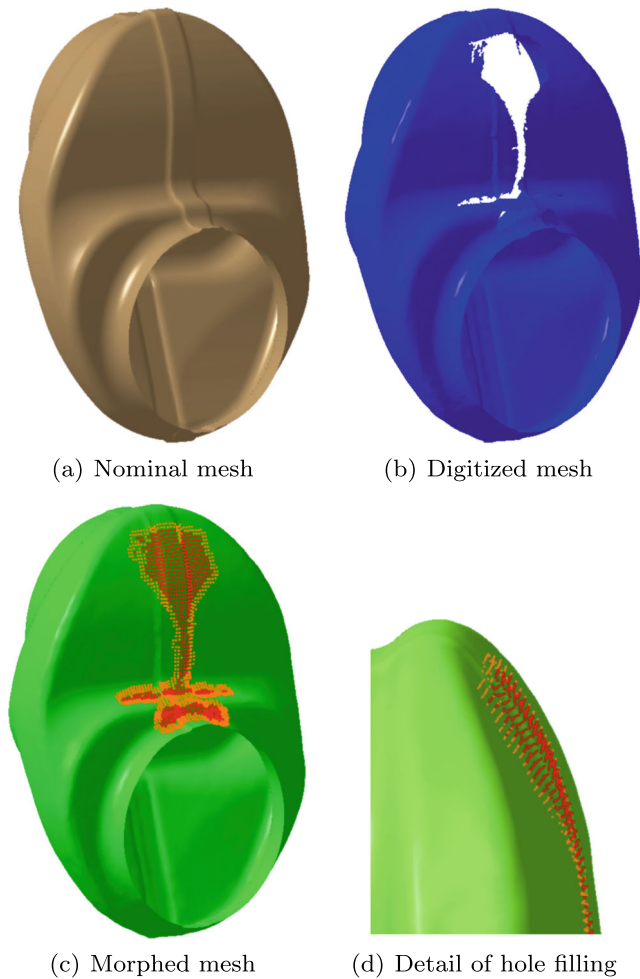


Fig. 15 Representation of studied part of the crankshaft

lack of data corresponds to the top plane (Fig. 16b). As displayed in the figure, only a few points are digitized on the

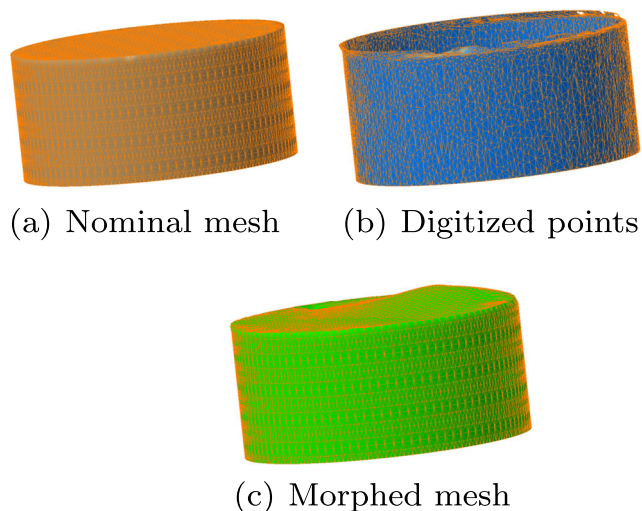


Fig. 16 The studied cylinder

plane surface, which involves that only a few points can be used to define the border of the planar portion. In addition, due to the tangency discontinuity between the plane and the cylinder, digitizing noise is high in this area. As a result, the calculation of the imposed displacements is heavily altered, and the resulting morphed mesh is incorrect (Fig 16c).

4.4 Discussion

The applications we proposed highlight the relevance of the morphing-based approach based on the CAD model to fill digitizing holes prior to point exploitation. This is clearly illustrated through the crankshaft balancing example. When digitized data are used, although digitized holes present a complex geometry, and despite digitizing noise, the morphed mesh can be calculated. The general shape is preserved and all the holes are filled considering curvature continuity at the junctions. However, the method present some limits. First, the manufacturing process is assumed to be controlled, i.e., the shape of the actual part is not very different from the shape of the nominal part. This is generally the case for machining or additive manufacturing operations as proposed here. In addition, the hole must not cover a complete feature, as it is the case with the top plane of the cylinder. The great lack of points on the surface involves a bad shape prediction. Finally, digitizing noise can be penalizing at the vicinity of the part edges for which the evaluation of the normal vector can be deficient.

5 Conclusion

A complete approach has been presented in this paper for filling holes in point clouds with a priori knowledge of the CAD model. This approach relies on the morphing of the CAD model represented as a mesh according to the minimization of the mechanical energy. The mesh is associated to a beam lattice and, to preserve curvature continuity, all types of solicitations are considered (torsion, bending, and stretching). Hole-filling with shape preservation is particularly essential to facilitate applications such as rapid prototyping, finite element analysis, or inertia calculations as proposed in this paper. To prevent substantial computational time, a method of restriction of the meshes to the digitized hole areas has been developed. This method preserves the curvature connection between the deformed areas and the nominal mesh. As crankshaft balancing using optical means is nowadays a challenging issue, the application of the proposed approach concerns the calculation of unbalances using incomplete simulated digitized data. Using our approach,

in comparison with classical CAD-filling methods, showed a significant decrease in unbalance determination. The relevance of the morphing-based approach based on the CAD model to fill digitizing holes is also illustrated by actual digitized data. The method is efficient when the manufacturing process is controlled and when data are not affected by the digitizing noise (when it remains inferior to the mean value of the sensor noise). The morphed mesh can thus replace the point cloud for further point exploitation. Such a method could also help in the definition of digitizing strategy for complex parts. Indeed, complete digitizing is not necessary anymore when digitizing holes can be accurately filled with shape preservation.

Appendix A: stiffness matrix description

$$K_k^k = \begin{bmatrix} A_k^k & C_k^k \\ (C_k^k)^T & B_k^k \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_k^k = \begin{bmatrix} \frac{E^k \cdot S^k}{L^k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} \\ 0 & 0 & \frac{12 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^3} & 0 & -\frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G^k \cdot I_o^k}{L^k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 & \frac{4 \cdot E^k \cdot I^k}{L^k} & 0 \\ 0 & \frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4 \cdot E^k \cdot I^k}{L^k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_k^k = \begin{bmatrix} \frac{E^k \cdot S^k}{L^k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} \\ 0 & 0 & \frac{12 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^3} & 0 & \frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G^k \cdot I_o^k}{L^k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 & \frac{4 \cdot E^k \cdot I^k}{L^k} & 0 \\ 0 & -\frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4 \cdot E^k \cdot I^k}{L^k} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C_k^k = \begin{bmatrix} -\frac{E^k \cdot S^k}{L^k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^3} & 0 & -\frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{G^k \cdot I_o^k}{L^k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 & \frac{2 \cdot E^k \cdot I^k}{L^k} & 0 \\ 0 & -\frac{6 \cdot E^k \cdot I^k}{(L^k)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2 \cdot E^k \cdot I^k}{L^k} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Appendix B: frame transformation description

$$M_{\mathcal{R}\mathcal{R}^k} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_k\right) & 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_k\right) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_k\right) & 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_k\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\theta_k) & 0 \\ \sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

References

1. Audfray N, Mehdi-souzani C, Lartigue C (2012) A novel approach for 3d part inspection using laser-plane sensors. In: 12th CIRP conference on computer aided tolerancing, pp 1–3
2. Bernard A (2005) Virtual engineering: methods and tools. Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf 219:413–421
3. Besl PJ, Kay NDM (1992) A method for registration of 3d shape. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 14(5)
4. Chen J, Wu X, Wang MY, Li X (2013) 3d shape modeling using a self-developed hand-held 3d laser scanner and an efficient h-icp point cloud registration algorithm. Opt Laser Technol 45:414–423
5. Choi J, Szymczak A (2009) Fitting solid meshes to animated surfaces using linear elasticity. ACM Trans Graph - TOG 28(1):1–10
6. Derigent W, Chapotot E, Ris G, Remy S, Bernard A (2007) 3d digitizing strategy planning approach based on a cad model. J Comput Inf Sci Eng 7(1):10–19
7. Galantucci LM, Percoco G, Spina R (2003) Evaluation of rapid prototypes obtained from reverse engineering. Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf 217:1543–1552
8. Grassia L, Hraiechb N, Schileoa E, Ansalonia M, Rochetteb M, Vicecontia M (2011) Evaluation of the generality and accuracy of a new mesh morphing procedure for the human femur. Med Eng Phys 33:112–120
9. Jun Y (2005) A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering. Comput Aided Des 37(2):263–270
10. Kho Y, Garland M (2005) Sketching mesh deformations. In: Proceedings of the ACM symposium on interactive 3D graphics
11. Lartigue C, Quinsat Y, Mehdi-souzani C, Zuquete-Guarato A, Tabibian S (2014) Voxel-based path planning for 3d scanning of mechanical parts. Comput Aided Des Applic 11(3):220–227
12. Li Z, Meek DS, Wlaton D (2010) Polynomial blending in a mesh hole-filling application. Comput Aided Des 42(4):340–349
13. Martins FAR, Garci-Bermejo J, Casanova EZ, Gonzalez JRP (2005) Automated 3d surface scanning based on cad model, mechatronics. Mechatronics 15:837–857
14. Medhi-Souzani C, Thiebaut F, Lartigue C (2006) Scan planning strategy for a general digitized surface. J Comput Inf Sci Eng 6(4):331–340
15. Panchetti M, Pernot JP, Véron P (2010) Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications. Comput Aided Des 42(8):693–707
16. Patil S, Ravi B (2005) Voxel-based representation, display and thickness analysis of intricate shapes. In: 9th International conference on computer aided design and computer graphics
17. Pernot JP, Moraru G, Vron P (2006) Filling holes in meshes using a mechanical model to simulate the curvature variation minimization. Comput Graph 30(6):892–902

18. Soren L, Kjellander J (2008) Path planning for laser scanning with an industrial robot. *Robot Auton Syst* 56(7):615–624
19. Wang J, Oliveira M (2007) Filling holes on locally smooth surfaces reconstructed from point clouds. *Image Vis Comput* 25(1):103–113
20. Wang LC, Y-C H (2012) Hole filling of triangular mesh segments using systematic grey prediction. *Comput Aided Des* 44(12):1182–1189
21. Wang X, Liu X, Lu L, Cao BLJ, Yinf B, Shig X (2012) Automatic hole-filling of cad models with feature preserving. *computers and graphics. Comput Graph* 36(2):101–110
22. Wu X, Chen J, Wang MY, Li X (2011) Hong-tan based icp registration for partially overlapping range images. *VRCAI*
23. Zheng SX, Li J, Sun QF (2011) A novel 3d morphing approach for tooth occlusal surface reconstruction. *Comput Aided Des* 43(3):293–302
24. Zhou X, Su Z, Liu X (2010) A novel energy-based method for mesh deformation. In: *International conference on educational and information technology*, pp 153–156
25. Zhu L, Barhak J, Srivatsan V, Katzr R (2007) Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 32:505–515
26. Zuquete-Guarato A, Mehdi-souzani C, Quinsat Y, Lartigue C, Sabri L (2012) Towards a new concept of in-line crankshaft balancing by contact less measurement: process for selecting the best digitizing system. In: *11th Biennial conference on engineering systems and design analysis*

Titre : Apport de la mesure *in-situ* pour la maîtrise de la qualité des surfaces fabriquées

Mots clés : *Topographie de surface, Mesure in-situ, Mesure sans contact, Stéréo-Corrélation, Usinage 5 axes, FAO*

Résumé : Actuellement, les pièces de formes complexes sont réalisées par des procédés de plus en plus automatisés, à l'aide de machines outil à 5 axes ou de robots. Le processus de fabrication s'appuie sur la définition d'une gamme de fabrication et se décompose en différentes étapes à partir de la définition du cahier des charges. À chacune de ces étapes, des écarts géométriques entre la forme souhaitée et la forme obtenue peuvent apparaître. La surveillance des procédés de fabrication est donc nécessaire, nécessitant même une mesure à 100% des pièces produites lors de la phase de la stabilisation du processus. Ainsi, mes travaux portent sur maîtrise de la qualité des surfaces produites en vue d'améliorer le procédé de fabrication.

Ainsi, la définition des paramètres de la stratégie de fabrication est un élément déterminant dans le processus de fabrication. La première partie de mes travaux est consacrée à l'amélioration de la prédiction de la topographie des surfaces générées par le procédé d'usinage. Un autre aspect des travaux sur l'amélioration de la qualité des surfaces concerne l'intégration des opérations de contrôle au sein du moyen de production, afin de réaliser une mesure dite *in-situ*. Enfin, la dernière partie des travaux réalisés ont pour objectifs de proposer des stratégies de numérisation minimisant le nombre de configurations capteur et la quantité de données acquises tout en contrôlant la qualité.

Title : Contribution of the *in-situ* measurement in manufactured surfaces quality control

Keywords : *Surface topography, In situ Measurement, Non contact sensor, Stereo correlation, 5 axis Machining, CAM*

Abstract : Currently, complex parts are produced by more and more automated methods, using 5-axis machine tool or robots. The manufacturing process is based on the definition of a process planning and is divided into different steps from the definition of design requirements. At each step, geometric deviations between the desired shape and the form obtained may appear. Thus the monitoring of manufacturing processes is necessary, requiring 100% of parts checked during the phase of stabilization of the process. So, this work focuses on controlling the quality of the surfaces produced in order to improve the manufacturing process

Thus, defining the parameters of the manufacturing strategy is a key element in the manufacturing process. The first part of this work is devoted to improve the prediction of the surface topography generated by the machining process. Another aspect of this work on improvement of the surface quality is focused on the integration of control operations within the machine tool in order to achieve a so-called *in-situ* measurement. Finally, the last part of the work are aimed to provide digitizing strategies minimizing the number of sensor configurations and the amount of data acquired while controlling quality.